

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Univerzitní studijní programy

**Návrh a realizace energy managementu demonstračního vozítka
s elektrickým pohonem**

Design and Implementation of Energy Management for
Demonstration Vehicle with Electric Drive

Student
Vedoucí diplomové práce

Bc. Stanislav Obrušník
Ing. Petr Šimoník Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Stanislav Obrusník

Studijní program:

N3943 Mechatronika

Studijní obor:

3906T007 Automobilová elektronika

Téma:

Návrh a realizace energy managementu demostračního vozítka s
elektrickým pohonem
Design and Implementation of Energy Management for Demonstration
Vehicle with Electric Drive

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte analýzu požadavků pro napájení elektronických systémů a současného stavu koncepce řešení a funkčnosti napájecích bloků vozidla Democar.
2. Na základě doporučení vedoucího, dále s uvážením parametrů pro napájení elektronických systémů vozidla Democar a s využitím informací shromážděných díky řešení bodu 1, proveďte návrh koncepce systému managementu energie. Definujte a respektujte možná provozní bezpečnostní rizika.
3. Proveďte praktickou realizaci bloků energy managementu vozidla Democar, včetně řídicí jednotky (Energy Management Control Unit, EMCU)
4. Navržená a realizovaná řešení ověřte praktickým provozním testem.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ERJAVEC, J.: Automotive Technology: A Systems Approach, 4th Edition, USA 2004, Thomson Learning, 1401 p., ISBN 1-4018-4831-1
- [2] RIBBENS, B., W.: Understanding Automotive Electronics, Sixth Edition, USA 2003, Elsevier Science, 480 p., ISBN 0-7506-7599-3
- [3] DENTOM, T.: Automotive Technology: Advanced Automotive Fault Diagnosis, 2th Edition, USA 2004, Butterworth-Heinemann Ltd. 2006, 288 p., ISBN 0-7506-6991-8
- [4] Robert Bosch GmbH: Bosch Yellow Jackets Series, Bosch Technical Literature, 1996-2014
- [5] Stockel, W., M., Stockel, T., M., Johanson, Ch.: Auto Diagnosis, Service, and Repair, 7th Edition, Goodheart-Willcox, USA 2003, 1024 p., ISBN 978-1566379106

Dále dle pokynů vedoucího závěrečné práce.

ČESKÁ TECHNICKÁ

Ing. Zdeňka Chmelíková, Ph.D.
prorektorka pro studium

VERONICA KUTCHY

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21.5.2018.

.....

Podpis

Prohlašuji že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21.5.2018.

.....
Podpis

Jméno a příjmení autora práce

Adresa trvalého pobytu autora práce

Stanislav Obrusník

ČS. Armády 336

742 83 Klimkovice

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Petru Šimoníkovi, Ph.D., za odborné konzultace a cenné připomínky při práci na diplomovém projektu. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Sobkovi, Ph.D., za předání informací ohledně programovacího prostředí CodeWarrior a za pomoc při oživení řídicí jednotky. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svému kolegovi Bc. Jakubu Kysovi za jeho spolupráci na demonstračním vozidle. Nakonec děkuji své rodině za podporu při studiu.

Anotace diplomové práce

OBRUSNÍK, Stanislav. *Návrh a realizace energy managementu demonstračního vozítka s elektrickým pohonem*. Ostrava, 2018. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Šimoník, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá systémem energy managementu demonstračního vozidla zvaného Democar. Navazuje na předchozí řešení a stávající systém doplňuje o robustní aplikační software a elektronický datový přepínač. V úvodní části jsou popsány základní informace o všech elektronických systémech ve vozidle a jejich požadavky vzhledem k systému energy managementu. Další kapitola v úvodu nastiňuje konkrétní koncepční řešení systému energy managementu včetně analýzy současného stavu a popisu použitých metod a technologií. Na tuto část navazuje definice možných bezpečnostních rizik podle normy ISO 26262. Další část je věnována praktické realizaci zejména elektronického přepínače a aplikačního softwaru řídicí jednotky. Poslední kapitola je věnována ověření funkce elektronického přepínače a vytvořeného aplikačního softwaru.

Klíčová slova

Akupack, balanční systém, balancování, Energy Management, Energy Management Control Unit, LiFePO₄, nabíjení, řídicí jednotka, vybíjení.

Diploma Thesis Anotation

OBRUSNÍK, Stanislav. *Design and Implementation of Energy Management for Demonstration Vehicle with Electric Drive*. Ostrava, 2018. Diploma thesis. VŠB – Technical University of Ostrava. Thesis supervisor Ing. Petr Šimoník Ph.D.

This diploma thesis deals with the energy management system of the demonstration vehicle called "Democar". It follows up on the previous solution and supplements the existing system with robust application software and an electronic data switch. The introductory section describes basic information about all electronic systems in the vehicle and their requirements regarding the energy management system. The next chapter outlines specific conceptual solution of the energy management system including analysis of the current state and description of used methods and technologies. This part is followed by the definition of possible safety risks according to the ISO 26262 standard. The next part is devoted particularly to practical realization of the electronic switch and the application software of the control unit. The final chapter is devoted to verifying the function of the electronic switch and the developed application software.

Keywords

Akupack, balancing system, balancing, Energy Management, Energy Management Control Unit, LiFePo₄, charging, Control Unit, discharging.

Seznam použitých symbolů a zkratk

2WD	<i>Two-Wheel Drive</i> (Pohon dvou kol)
4WD	<i>Four-Wheel Drive</i> (Pohon čtyř kol)
AKO	<i>Astabilní klopný obvod</i>
AMPSEAL	<i>Automotive Plug Connector and Header Assembly</i> (Automobilový připojovací konektor)
ASIL	<i>Automobile Safety Integrity Level</i> (Úroveň integrity automobilové bezpečnosti)
BCU	<i>Brakes Control Unit</i> (Řídicí jednotka brzdového systému)
BMS	<i>Battery Management System</i> (Systém bateriového managementu)
BSR	<i>Bistabilní relé</i>
C	<i>Kapacita</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i> (Automobilová sběrnice)
CCU	<i>Central Control Unit</i> (Řídicí jednotka centrální elektroniky)
Č1, ČN	<i>Akumulátorový článek č. 1, akumulátorový článek N</i>
DCU	<i>Drive Control Unit</i> (Řídicí jednotka pohonu)
EMCU	<i>Energy Management Control Unit</i> (Řídicí jednotka energy managementu)
EMS	<i>Energy Management System</i> (Systém managementu energie)
FET	<i>Modul pro řízení nabíjecího proudu</i>
GND	<i>Ground</i> (Signálová a logická zem)
GPIO	<i>General-purpose input/output</i> (Univerzální vstupně/výstupní pin)
HV	<i>High Voltage</i> (Vysoké napětí)
IO	<i>Integrovaný Obvod</i>
L	<i>Indukčnost</i>
LCU	<i>Lighting Control Unit</i> (Řídicí jednotka osvětlení)
LiFePo ₄	<i>Lithium-železo-fosfátový akumulátor</i>
MCU	<i>Microcontroller Unit</i> (Jednočipový mikropočítač)

MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field effect transistor</i> (Tranzistor řízený elektrickým polem)
Opt	<i>Optočlen</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Pulzně šířková modulace)
R, R1, RN	<i>Rezistor, Rezistor č. 1, Rezistor N</i>
R_nab	<i>Omezovací rezistor při nabíjení meziobvodu měničů</i>
Rx, Tx	<i>Rx-přijaté, Tx-odeslané</i>
S1, SN	<i>Spínač č. 1, Spínač N</i>
SCU	<i>Steering Control Unit</i> (Řídicí jednotka řízení)
SIL	<i>Safety Integrity Level</i> (Úroveň integrity bezpečnosti)
ST	<i>Stykač</i>
SWD	<i>Steer by Wire</i> (Řízení bez mechanické vazby po vodičích)
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver and Transmitter</i> (Sběrnice pro komunikaci mezi balančními moduly)
UART_bat	<i>Universal Asynchronous Receiver and Transmitter – battery</i> (Sběrnice pro sériovou komunikaci mezi balančními moduly)
UART_X	<i>Universal Asynchronous Receiver and Transmitter</i> (Sběrnice pro sériovou komunikaci)
Vcc	<i>Napájecí napětí elektronického přepínače</i>

C	<i>Kapacita</i>	[F]
I	<i>Proud</i>	[A]
L	<i>Indukčnost</i>	[h]
N	<i>Otáčky</i>	[RPM]
R	<i>Odpor</i>	[Ω]
t	<i>Čas</i>	[s]
U	<i>Napětí</i>	[V]

Obsah

1. Úvod	12
2. Struktura elektronických systémů vozidla Democar.....	13
2.1 Systém energy managementu	15
2.2 Systém centrální elektroniky	15
2.3 4WD pohon.....	16
2.4 Systém servořízení.....	16
2.5 Systém brzd	17
2.6 Systém osvětlení	18
3. Návrh koncepce systému managementu energie.....	18
3.1 Analýza současného stavu EMS vozidla Democar	19
Analýza akupacků.....	19
Analýza řídicí jednotky	21
Analýza stavu baterií	22
3.2 Popis použité technologie balančního systému	23
Balancování	23
Pasivní metoda balancování.....	24
Aktivní metody balancování	25
Použitý balanční systém	28
3.3 Koncepce systému energy managementu.....	32
Akupack 12 V a 24 V	33
Akupack 530 V	34
3.4 Definice možných bezpečnostních rizik.....	35
4. Praktická realizace.....	38
4.1 Elektronický datový přepínač	38
4.2 Vývoj aplikačního softwaru.....	45
5. Experimentální ověření.....	48
5.1 Test detekce stavu podbíjení.....	48
5.2 Test detekce stavu přebíjení	49
6. Závěr	52
Seznam použité literatury.....	53
Seznam příloh	54

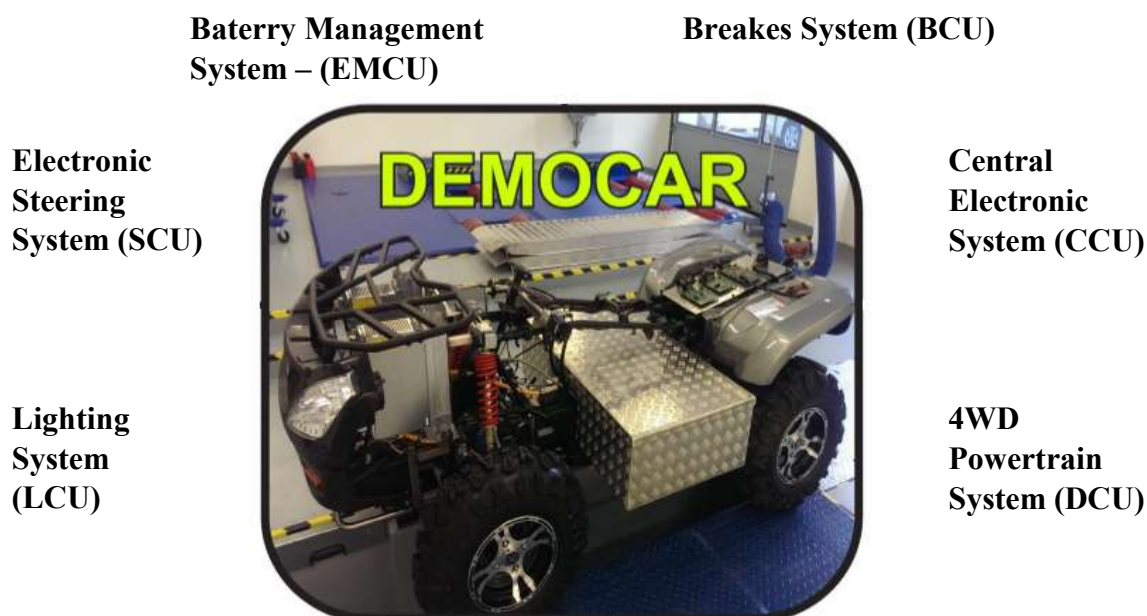
1. Úvod

Cílem většiny států Evropské unie je do roku 2020 snížit emise výfukových plynů, a naopak zvýšit podíl obnovitelné energie, což v globálu povede ke zlepšení celkové energetické účinnosti. Tyto cíle jsou předávány průmyslu pomocí financování, nebo zavedením určitých pravidel. Při bližším pohledu do odvětví automobilového průmyslu, tyto zásahy vedou například ke zdokonalování technologie ukládání energie, nebo vylepšování samotné koncepce pohonného systému. Následkem toho dochází k pozvolnému nahrazování dopravních prostředků poháněných fosilními palivy vozidly elektrickými. Na začátku této myšlenky byl vývoj koncepčních vozidel. Jedním z těchto je právě elektrické demonstrační vozidlo Democar využívající nejnovějších technologií v oblasti energy managementu. Jednou z těchto technologií jsou například lithium-železo-fosfátové akumulátory, jejichž tok energie je regulován pomocí sofistikovaného balančního systému. Návrhem a realizací energy managementu vozidla Democar se zabývá tato diplomová práce.

2. Struktura elektronických systémů vozidla Democar

Vozidlo Democar je dálkově ovládaný elektromobil vyvíjený studenty pod záštitou VŠB-TUO. Při přestavbě vozidla se vcházelo z platformy sériově vyráběné offroadové čtyřkolky. Z důvodů zásahů do vozidla (změna pohonu, úprava rámu) by dnes toto vozidlo již neprošlo homologační zkouškou, a není proto vhodné k provozu na pozemních komunikacích. V současné době slouží jako základ pro realizaci bakalářských, diplomových prací a pro výukové a demonstrační účely.

Hnací sílu zajišťují čtyři synchronní elektromotory s permanentními magnety zn. Baumuller (4,2 kW), přičemž každý pohání své vlastní kolo. Díky sofistikovaným elektronickým systémům je možné rozdělit moment motorů na jednotlivá kola a zajistit elektronicky funkci diferenciálu, nebo například ovládat celé vozidlo na dálku. Elektronické systémy vozidla jsou rozděleny do šesti subsystémů. Každý subsystém je reprezentován řídicí jednotkou. Všechny jednotky jsou připojeny k centrální sběrnici CAN, po které spolu komunikují. Hlavní úlohu zde plní řídicí jednotka centrální elektroniky – CCU, jež je v kooperaci se všemi přítomnými systémy. Získává od nich důležité údaje, zpracovává je, odesílá a řídí ostatní subsystémy. Jedním ze subsystémů, s kterým spolupracuje je Energy Management System (dále jen „EMS“). Návrhem a realizací EMS se zabývá tato diplomová práce. Na obrázku č. 2.1 je vyfoceno výše popsané vozidlo s rozpisem jednotlivých systémů a s označením jednotek.



Obr. 2.1 Subsystémy implementované ve vozidle Democar

2.1 Systém energy managementu

V principu se systém energy managementu zabývá řízením dodávky energie, skladováním energie a dodávkou energie zpět tzn. dobíjením. Cílem je ušetřit co nejvíce nákladů na samotný provoz systému, ochránit životní prostředí a udržet dodávku energie za všech možných podmínek, vyjma situací kdy může dojít při jeho užívání k úrazu elektrickým proudem.

Jediným zdrojem elektrické energie jsou zde akumulátory. Na dodávce elektrické energie jsou závislé všechny elektrické systémy. V případě náhlého výpadku za provozu se stává vozidlo neovladatelným, a může se stát nebezpečným jak pro posádku, tak i nejbližší okolí. Na všechny tyto aspekty byl brán zřetel, a proto byl do vozidla Democar implementován vysoce sofistikovaný systém, který zajišťuje:

- kontrolované řízení toku energie z akumulátorů,
- řízení dobíjení,
- získávání důležitých informací o stavu nabití, teplotě, počtu článků, napětí, dodávaném proudu, balančním proudu, atd.
- odpojení při vzniku nebezpečí, kterým může být např. porušení izolace systému, přehřátí článků, nadproud či zkrat v systému, aj.

Výhody takovýchto systémů vedly k tomu, že jsou dnes implementovány ve většině elektromobilů, nebo všude tam, kde je potřeba zajistit sofistikovanou metodou management energie. V současnosti se odvětví elektromobility výrazně rozšiřuje a předpokladem je, že se od elektromobility neustoupí a systémy energy managementu budou dále vylepšovány. Jedním z bodů této diplomové práce je návrh koncepce systému energy managementu demonstračního vozidla Democar, o kterém je více pojednáno v kapitole č. 3.

2.2 Systém centrální elektroniky

Bez systému centrální elektroniky by provoz vozidla nebyl možný. Jeho základní funkcí je příjem a zpracování signálu z dálkového ovladače, ten bere jako náhradu za mechanické podněty řidiče, kterými jsou řízení, brzdění, přidávání a ubírání plynu. Řízení demonstračního vozidla Democar je velmi podobné dálkově ovládanému elektrickému autíčku. Jízda vpřed a vzad je ovládána páčkou na ovladači. Druhou páčkou je řízen směr jízdy. Řídící jednotka centrální elektroniky provádí správu nad systémy:

- energy managementu,
- servořízení,
- pohonu,

- brzd,
- osvětlení
- do budoucna i nad dalšími systémy jako například lidarový systém autonomní jízdy.

Systém centrální elektroniky do řídicí jednotky systému energy managementu prakticky nezasahuje. Zásah do řídicí jednotky EMCU jednotkou CCU je proveden pouze v případech zapnutí a vypnutí vozidla, kdy je potřeba připojit nebo odpojit přívod elektrické energie do ostatních systémů. Jednotka CCU tedy také ovládá spuštění přívodu energie ke všem ostatním systémům. Systém centrální elektroniky je napájen jednou z baterií vozidla i v případě, že vozidlo není v provozu. V tuto chvíli pracuje v tzv. „Stand-by“ režimu, kdy je připraven na podněty přicházející z dálkového ovladače. Napájení centrální jednotky je zabezpečeno palubní sítí vozidla. Vzhledem k nízkému odběru jednotky jsou nároky na napájecí zdroj minimální.

2.3 4WD pohon

V současné době je funkčnost vozidla Democar otestována na pohonu 2WD. V minulosti již při návrhu pohonu bylo počítáno s rozšířením tohoto pohonu na 4WD. Proto bylo vozidlo zastaveno čtyřmi třífázovými synchronními elektromotory o výkonu 4,2 kW a 43 Nm při 1000 RPM řízenými čtyřmi frekvenčními měniči. Točivý moment čtveřice motorů je přenášen na kola pomocí jednostupňových převodovek s převodovým poměrem 1:1. Převodovky mají kolmé vstupní a výstupní hřídele, protože rozměry vozidla neumožňují zástavbu souosých převodovek. Do budoucna se z důvodu lepší využitelnosti točivého momentu motorů plánuje nahradit tyto převodovky převodovkami s převodovým poměrem 4:1, nebo dokonce vyšším.

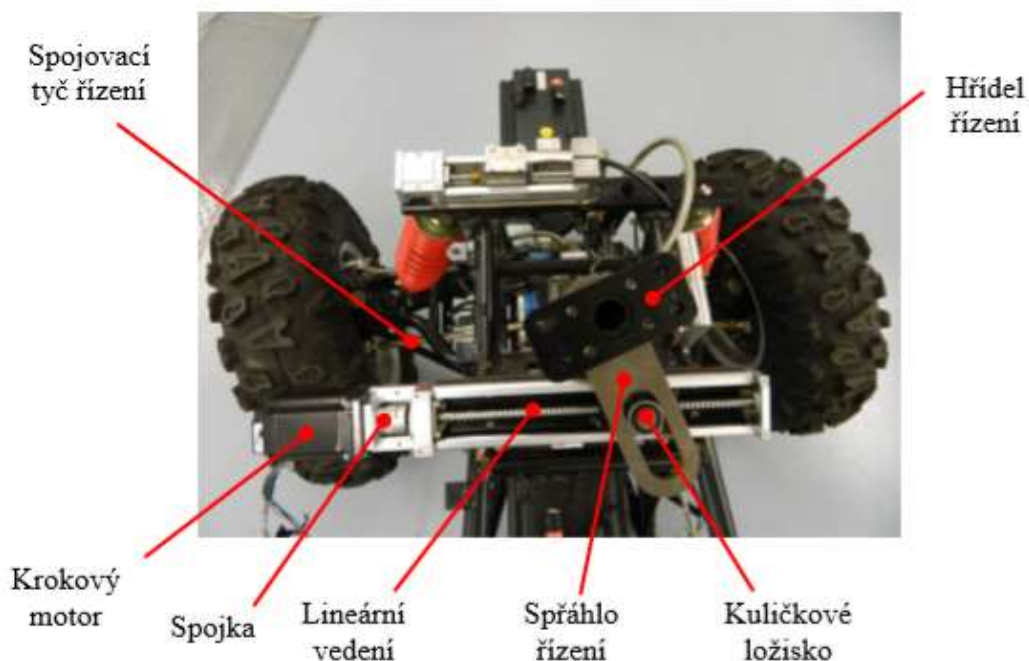
V současné době se také řeší problematika součinnosti brzdového systému se systémem pohonu. V situaci, kdy je nutné vozidlo zastavit např. při vyhnutí se překážce, je nutné vyvinout maximální brzdový účinek na kola, ale současně je nutné snížit či úplně anulovat momenty motorů. Proto je potřeba zajistit dokonalou synchronizaci obou systémů.

Vzhledem k požadavkům pohonu byl v minulosti vytvořen akupack s nominálním napětím 530 V. Tento dodává energii výhradně jen frekvenčním měničům pohonu. Měniče pohonu vyžadují také 24 V napájecí úroveň pro zajištění funkce jejich řídicích částí. Problematika požadavků na tyto napájecí úrovně je popsána v kapitole č. 3.

2.4 Systém servořízení

Jedním z nejdůležitějších systémů, bez kterého se demonstrační vozidlo neobejde, je systém řízení. Pro požadavek řízení vozidla na dálku dálkovým ovladačem již není možná mechanická vazba mezi řidičem a řízenou nápravou, proto byl vyvinut systém servopohonu

Steer-by-Wire tzv. “řízení po drátu“. Otáčení kol přední nápravy je řešeno lineárním vedením s krokovým motorem. Ten přes spřáhlo ovládá hřídel řízení a ta přes spojovací tyče pohybuje s koly. Fotografie tohoto systému je na obrázku níže.



Obr. 2.3 Popis systému servořízení [7]

Tento systém byl v minulosti intenzivně testován, v důsledku čehož byl doplněn o elektronický posilovač řízení z důvodu zvýšení dynamiky zatáčení. Posilovač řízení napájen baterií 12 V klade relativně velké požadavky na její kapacitu. Z tohoto pohledu byla již v minulosti kapacita této komponenty značně navýšena.

2.5 Systém brzd

Dalším neméně důležitým systémem je elektrohydraulický systém brzd. Při brždění se pohybová energie pohybujícího se vozu přeměňuje v teplo. Brzdová soustava umožňuje řízené vozidlo zpomalit, zastavit, případně přimět vozidlo, aby setrvalo v klidu za jakékoliv situace. V minulosti byl sériový brzdový systém doplněn o modulátor tlaku a vlastní řídicí jednotku BCU. Funkce brzd byla omezena pouze na přední nápravu. V současné době je tento systém dále rozšiřován o brzděnou zadní nápravu, nouzovou brzdu a sofistikovanější elektrohydraulický systém. Z pohledu energy managementu představuje brzdový systém další relativně značnou zátěž. Hlavní zátěž zde představuje zmiňovaný modulátor tlaku, který slouží ke generování zásobního tlaku. Tento je nutný pro zabrzdění vozidla např. při výpadku elektrické energie, nebo pro aktivaci nouzové brzdy. Je nutné vyvarovat se problémům, v situacích, kdy se vozidlo stane neřiditelným v důsledku výpadku energie z EMS.

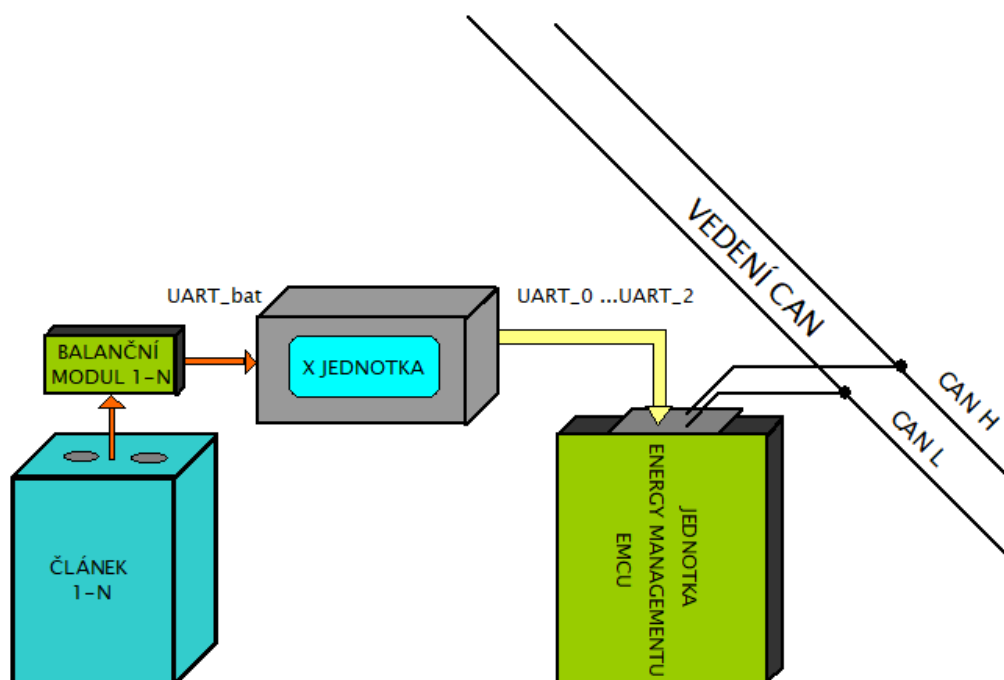
Problematikou stanovení rizik a jejich předejití při vzniku poruchy EMS systému se zabývá jedna z kapitol této DP.

2.6 Systém osvětlení

S vývojem elektroniky v automobilovém průmyslu vzrostly nároky také v oblasti osvětlovacích soustav. Řídicí jednotky světel jsou stále sofistikovanější a umožňují mnoho možností. Pro zajištění co největšího dojezdu elektrického vozidla Democar jsou nároky na úsporu energie velmi vysoké. Značně využívaná je zde technologie LED, která představuje v současné době nejvýhodnější poměr v oblasti cena/efektivita. Díky tomu je odběr energie až 5x menší než u klasické technologie. Po nahlédnutí do hlubší HW struktury řídicí jednotky osvětlení vozidla Democar, jsou zde implementovány speciální elektronické obvody, zajišťující nejen přesné řízení světlometů, ale i dobrý dohled nad stavem připojených spotřebičů. EMS systém zde plní pro systém osvětlení pouze funkci distributora.

3. Návrh koncepce systému managementu energie

Tato část diplomové práce je zaměřena na návrh a realizaci energy managementu vozidla Democar. Řešení by mělo navázat na předchozí koncepční řešení [6], a rozšířit tento systém o předešlé koncepční nedostatky. Rozšíření se týká především vytvoření robustního aplikačního software řídicí jednotky EMCU, úpravě stávajícího koncepčního zapojení systému energy managementu a návrhem elektronického datového přepínače, jehož funkce je popsána v kapitole č. 4. Následující obrázek představuje koncepční řešení systému energy managementu vozidla Democar, kterým se zabývá tato diplomová práce.



Obr. 3.1 Principiální blokové schéma systému energy managementu

Na obrázku č. 3.1 je zakresleno obecné blokové schéma vysvětlující koncepci systému EMS použitého ve vozidle Democar. Zdrojem energie jsou zde LiFePo₄ akumulátory (popsáno níže). K jejich elektrodám jsou pomocí šroubů připevněny elektronické obvody zvané „balanční moduly“, které zajišťují monitoring parametrů, a tímto, mimo jiné, dochází k udržení vytipovaných parametrů akumulátorů v předepsaných mezích. Pomocí sériové komunikace jsou vybrané parametry odesílány do bateriové řídicí jednotky s názvem X. Jednotka X dále odesílá veškerá data do nadřazené jednotky energy managementu s názvem EMCU. Detailní popis funkce systému a jeho koncepce je uvedena v podkapitole č. 3.3.

3.1 Analýza současného stavu EMS vozidla Democar

Analýza akupacků

V úvodní fázi návrhu a praktické realizace musel být analyzován současný stav systému managementu energie. V prvním kroku byla analyzována trojice akupacků představující napájecí úrovně 12 V, 24 V a 530V. Akupack jako celek představuje zdroj elektrické energie pro daný elektronický systém. Je tvořen baterií o přesně definovaném počtem článků, která je umístěna ve hliníkovém boxu společně balančním systémem zajišťující kontrolu nad bateriemi. Jelikož se vozidlo Democar neustále vyvíjí, byly shrnuty aktuální požadavky na napájení do níže uvedené tabulky.

Tab. 3.1 Analýza požadavků všech systémů na napájení

Elektronický systém	4WD Pohon	Servořízení	Brzdový systém	Systém osvětlení
Požadované napájecí napětí	24 V – log. část 530 V – pohon	24 V – řízení 12 V – posilovač	12 V	12 V

Podle požadavků na napájecí úrovně elektronických systémů zastoupených v tabulce č. 3.1 neexistuje nový požadavek na další napájecí úroveň. V následující tabulce je uveden detailnější popis koncepce z pohledu napětí, kapacity, počtu článků a umístění akupacků na vozidle.

Tab. 3.2 Popis sestavy akupacků

Napětíová hladina	12 V	24 V	530 V
Počet článků	16	16	156
Zapojeno sériově x paralelně	4x4	8x2	156x0
Skutečná kapacita akupacku	80 Ah	40 Ah	20 Ah
Umístění	Přední část před řízením	Přední část před řízením	Spodní pod sedadlem

V průběhu práce na projektu se vyskytl požadavek na změnu tvaru hliníkových boxů, v níž jsou akumulátory zakomponovány, což vedlo ke změně umístění jedné z bateriových sestav. Při návrhu byl brán ohled na možné zástavbové prostory vozidla Democar a jeho výslednou hmotnost.

Následně byl proveden jízdní test, který měl ověřit výdrž baterií. Stanovila se tak přibližná doba provozu na jedno nabití. Jízdní test představoval situaci, kdy je vozidlo v pohybu, zatáčí a jsou aktivní všechny ostatní systémy včetně světlometů. Při testu byly měřeny proudy odebírané z jednotlivých akupacků, o čemž pojednává následující tabulka.

Tab. 3.3 Odebíraný proud na dané napěťové úrovni

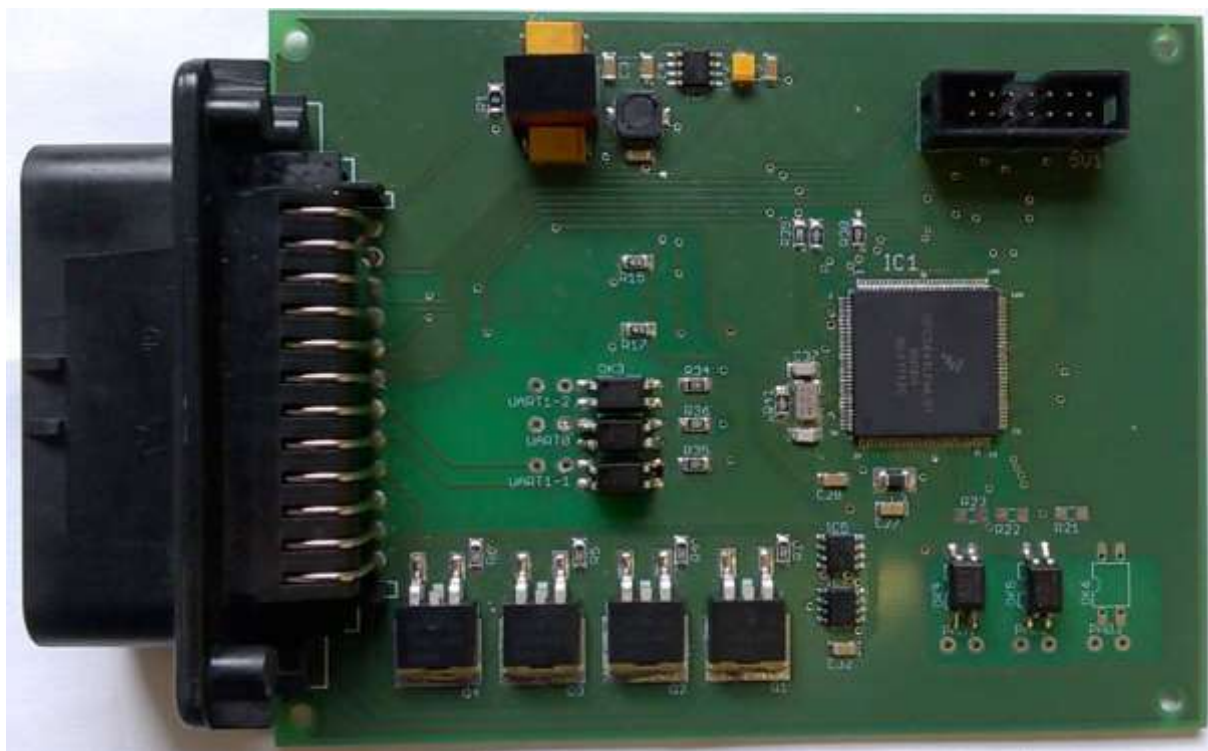
Akupack	12 V	24 V	530 V
Odebíraný proud při testovací jízdě	10 A	4 A	0,5 Ah

Podle kapacity jednotlivých akupacků byla stanovena přibližná doba provozu. Limitujícím faktorem se stal akupack 12V s kapacitou 80Ah. Při kapacitě baterie 80 Ah a za těchto provozních podmínek by mělo být vozidlo schopné provozu po dobu 8 h. U baterie 24 V vychází doba provozu o něco delší, tedy 10 h a baterie 530 V by měla udržet vozidlo v pohybu po dobu až 40 h. Z tohoto pohledu doporučuji do budoucna navýšení kapacity baterie 12 V.

Analýza řídicí jednotky

Řídicí jednotka byla již v minulosti navržena. Plnila však pouze účel ověřit použitelnost vybraného balančního systému. Vnější periferie, mikrokontrolér a další použité komponenty byly voleny s ohledem na další vývojový stupeň, jímž se stal vývoj robustního softwaru, který by měl obstarávat strategii řízení energy managementu demonstračního vozidla. Počítalo se zde tedy s následným využitím této jednotky do budoucna. Při ožívování jednotky se objevily závady týkající se disfunkce implementovaného mikrokontroléru a obvodu krystalového oscilátoru.

Struktura řídicích jednotek ve vozidle Democar je jednotná pro všechny elektronické systémy. To platí i pro jednotku EMCU. Řídicí jednotka EMCU disponuje 36 pinovým konektorem typu AMPSEAL, 32 bitovým, dvoujádrovým mikrokontrolérem Quorivva MPC5643L, rozhraním CAN a od ostatních jednotek se liší využitým rozhraním UART pro účel čtení dat z řídicích jednotek baterií. Dále je jednotka vybavena čtveřicí MOSFET tranzistorů napojených na GPIO výstupy mikrokontroléru pro případné další využití.



Obr. 3.2 Řídicí jednotka energy managementu

Analýza stavu baterií

Po téměř roční odstávce, kdy akumulátory zůstávaly ve stavu téměř naprostého vybití, bylo nutné provést jejich postupné oživení. Články byly rozděleny do několika skupin podle stupně jejich nabití a následně nabíjeny lineárními zdroji. Většina akumulátorů jevila znaky dobrého stavu, avšak u několika článků došlo k nevratné chemické reakci, která je zničila. Vadné články byly nahrazeny novými.

Nominální napětí jednoho článku se pohybuje okolo 3,3 V. Plně nabitý akumulátor vykazuje hodnoty napětí 3,6 V, a ve vybitém stavu jeho napětí může klesnout až na hodnotu 2,8 V. Jedná se o technologii LiFePO₄ neboli Lithium-Železo-Fosfátové akumulátory. Tyto články byly vyvinuty již v roce 1996 na univerzitě v Texasu. Jejich výhodou oproti jiným druhům, například lithium iontovým či polymerovým, je vysoká provozní bezpečnost a řádově vyšší životnost. V případech zkratování, či přebíjení nehrozí žádná exploze. [1]



Obr. 3.3 Ukázka článků LiFePO_4

Další výhodou této technologie je vysoká časová stálost. Zatímco běžný lithium polymerový (Li-Pol) či lithium iontový (Li-Ion) článek se po přibližně 300-1000 nabíjecích cyklech chemicky degraduje, LiFePO_4 akumulátor si i po 10 000 cyklech zachová přibližně 80 % svojí původní kapacity. Nevýhodou je však vyšší hmotnost při přepočtu na objem uložené energie. U Li-Pol nebo Li-Ion akumulátorů je energetická hustota přibližně 150-200 Wh/kg. U LiFePO_4 akumulátorů je to 80-100 Wh/kg.

LiFePO_4 články disponují velmi nízkým vnitřním odporem, to umožňuje akumulátor vybíjet i nabíjet vysokými proudy aniž by byla výrazně zvýšena jejich teplota, nebo zkrácena životnost. Nabíjet je možné proudem do 2 C a vybíjet proudem až 10 C. [1]

3.2 Popis použité technologie balančního systému

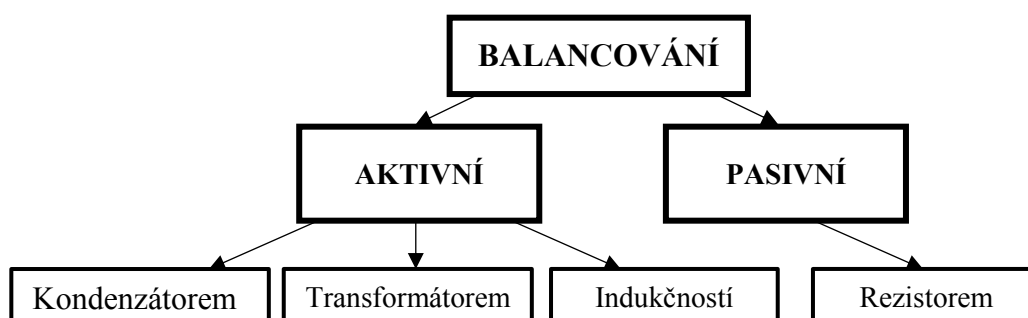
V úvodu této podkapitoly je vysvětlen popis funkce balancování článků. Následně jsou zde rozebrány možné metody balancování, načež navazuje popis konkrétního použitého balančního systému.

Balancování

Nové akumulátorové články mohou mít téměř stejnou kapacitu. S přibývajícími cykly však může docházet k rozdílům v kapacitě jednotlivých článků. Tyto rozdíly mohou klást nesourodé nároky na nabíjení jednotlivých článků. Článek s nižší kapacitou se bude nabíjet i vybíjet rychleji než ten s vyšší. Pro tento účel se využívají tzv. balanční systémy, jejichž funkční dělení znázorňuje obrázek č. 3.4.

Balanční systém zajišťuje:

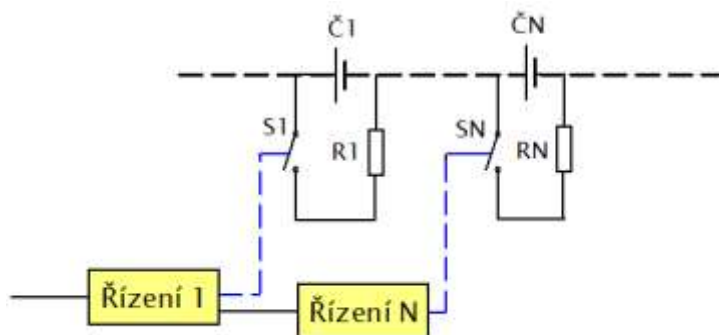
- limitaci procesu nabíjení v případě vysokých teplot,
- monitoring nebezpečně vysoké úrovně napětí článků při nabíjení,
- monitoring nebezpečně nízké úrovně napětí článků při vybíjení,
- monitoring kapacity článků,
- monitoring balančního proudu při nabíjení,
- minimalizuje rozdíly nábojů mezi jednotlivými články,
- minimalizuje účinky stárnutí článků.



Obr. 3.4 Typy balančních metod

Pasivní metoda balancování

Jedná se o nejrozšířenější metodu. U pasivní metody balancování je nadměrný elektrický náboj odváděn do pasivního rezistoru vlivem spínání aktivního prvku, tranzistoru. Pro spínání jsou zde obvykle použity tranzistory typu FET nebo MOSFET s velmi nízkým odporem v sepnutém stavu. Tím nedochází k tak velkým spínacím ztrátám a téměř všechny přebytečný výkon je mařen pouze na rezistoru, který může být umístěn na chladiči. [2]



Obr. 3.5 Pasivní metoda balancování

Výhody pasivní metody: levnější, jednodušší řešení.

Nevýhody: přebytečná energie je vyzařena do okolí ve formě tepla, v případě vyšších balancovacích proudů je nutné osadit moduly chladiči.

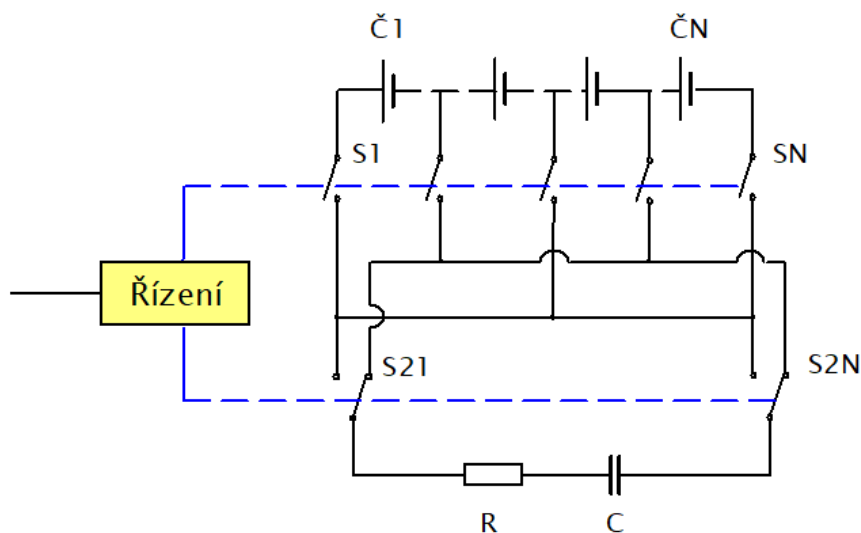
Balanční moduly implementované ve vozidle Democar využívají pasivní metodu balancování. Společně se sofistikovaným řízením nabíjení se však tento systém stává poměrně účinným. Balancování článků je u konce nabíjení prováděno pouze malým proudem. Poté je nabíjecí proud udržován na minimální hodnotě, čímž nedochází k velkým ztrátám v podobě odpadního tepla.

Aktivní metody balancování

Aktivní metoda přerozděluje náboj mezi jednotlivými články během cyklu nabíjení a vybíjení. Tím je zvýšeno využití dodaného náboje elektrickou sítí a zároveň může dojít ke snížení doby nabíjení.

Metoda balancování s kondenzátorem

Jednoduchý způsob jak redistribuovat energii mezi články je připojení kondenzátoru nejprve k článku s vyšším napětím, a následně k článku s nižším napětím. Tento princip je blokově znázorněn na obrázku č. 3.6.



Obr. 3.6 Aktivní metoda balancování s kondenzátorem

Nevýhodou této metody je, že během nabíjení kondenzátoru dochází k významným ztrátám energie, protože maximální účinnost tohoto procesu je 50%. Další nevýhodou je, že kondenzátor přenese energii nejúčinněji ve chvíli, kdy je mezi články velký rozdíl napětí.

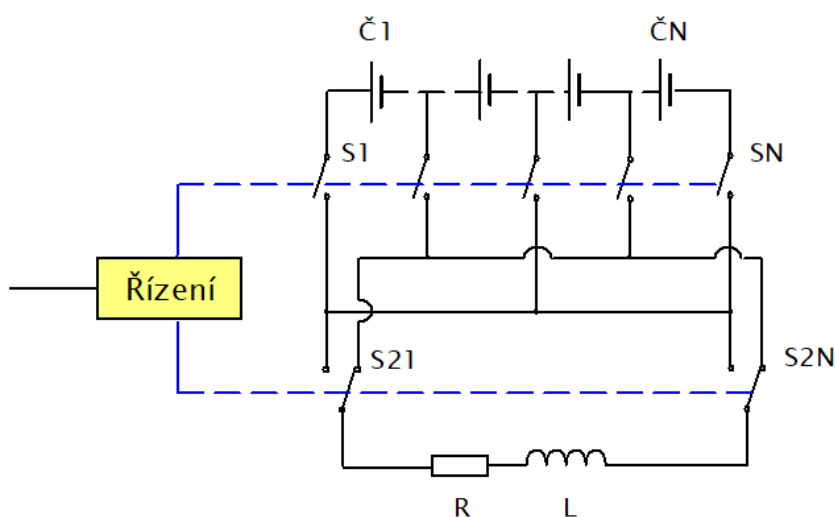
Vzhledem k tomu že rychlost přenosu energie je úměrná rozdílu napětí. Je tento proces efektivní pouze v závěru vybíjení. [2]

Výhody metody: účinnější než pasivní metoda.

Nevýhody: účinnost nabíjení kondenzátoru je velmi malá, nízká účinnost přenosu energie při malém rozdílu napětí mezi články.

Metoda balancování s indukčností

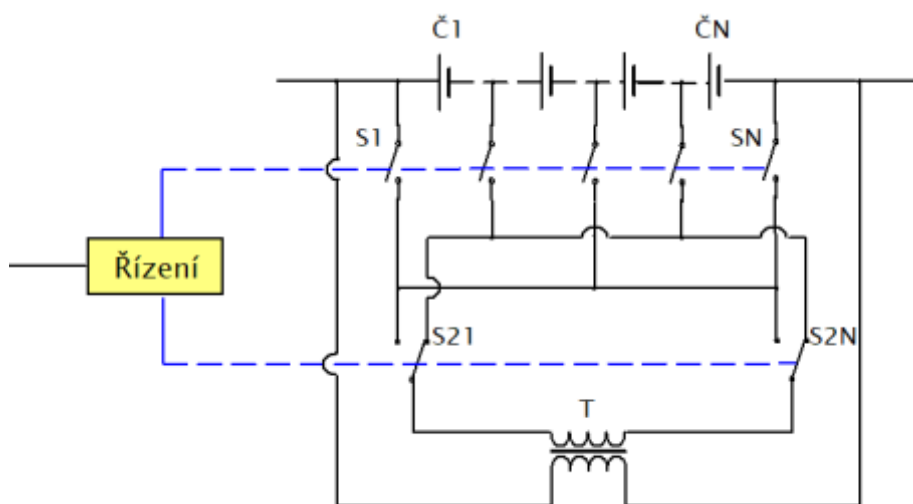
Tento balanční systém funguje na podobném principu jako systém s kondenzátorem. Jedinou změnou je zde náhrada kondenzátoru za indukčnost. Nevýhodou této metody je právě indukčnost, která mívá poměrně velké rozměry a hmotnost. Při užití takovýchto balančních modulů ve vozidle Democar by nastaly problémy s malými zástavbovými prostory a vysokou hmotností. [2]



Obr. 3.7 Aktivní metoda balancování s indukčností

Metoda balancování s měničem

Tato metoda umožňuje přenášet energii z celého akupacku do jednoho konkrétního článku s nízkým nábojem. Toto je zajištěno pomocí transformátoru nebo měniče. Účinnost přenosu je o něco větší než u předchozích tří metod. Užití transformátoru má za následek zvýšení ceny a velikosti celého zařízení. Tento systém je účinnější právě v systémech s vysokým výkonem, jako jsou například hybridní vozidla. [2]



Obr. 3.8 Aktivní metoda balancování s transformátorem

Výhody metody: vysoká účinnost přenosu náboje, využitelnost v systémech s vysokým výkonem.

Nevýhody: vysoká cena, rozměry a hmotnost systému.

Použitý balanční systém

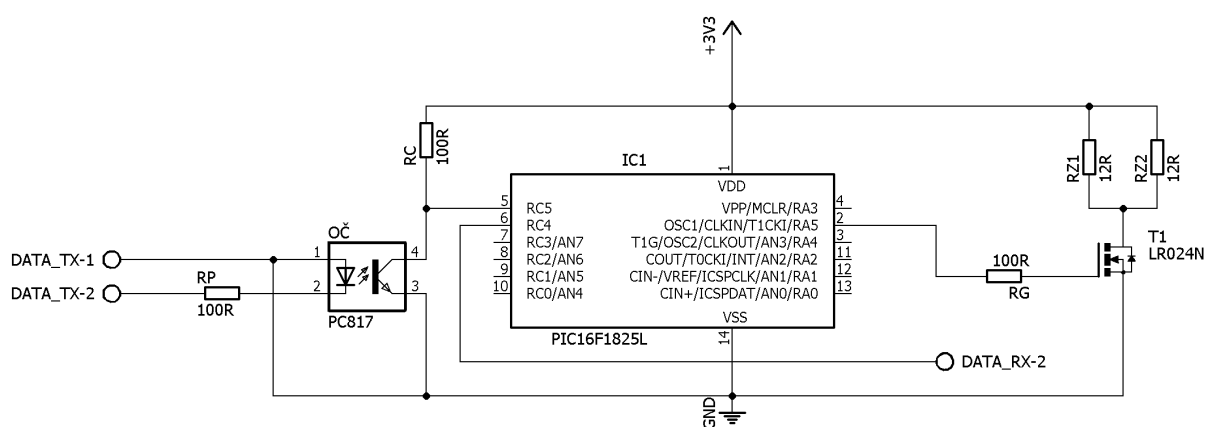
V současnosti je vozidlo Democar osazeno 188 akumulátorovými články rozdělenými do 3 akupacků, sestavených podle požadavků na napájecí úroveň. Každý článek je osazen balančním modulem od firmy EV-Auto. Tento získává 3 základní informace o:

- napětí článku,
- teplotě článku,
- balančním proudem článku,
- a generuje specifický identifikátor, který je jedinečný pro každý balanční modul.



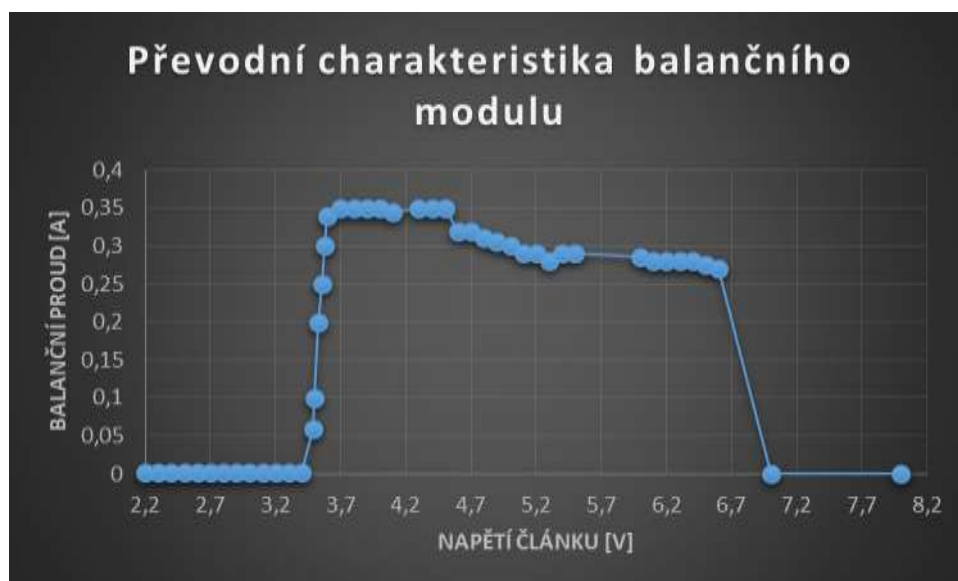
Obr. 3.9 Snímek balančního modulu na jednom z akumulátorů

Jedná se o pasivní balanční moduly s označením MICRO, které disponují rozměry 42x18mm. Podle výrobce dokáže tento modul balancovat s proudem až 350mA. Hodnota balančního proudu udává jak velký náboj je schopen balanční modul na sobě zmařit při kriticky vysoké hodnotě napětí na článku.



Obr. 3.10 Schéma zapojení balančního modulu

Na obrázku č. 3.10 je zakresleno schéma jednoho z balančních modulů. Ze schématu je patrné, že je napájen z vlastního akumulátoru. Klidový odběr balančního modulu je přibližně 1,2 mA. Při kapacitě akumulátoru 20 Ah by jeho vybití na nulovou kapacitu trvalo přibližně 800 dní. K nízkému odběru velmi přispívá mikrokontrolér PIC16F1825 zn. MICROCHIP, s klidovým odběrem pouhých 20 nA. Moduly mezi sebou komunikují skrze rozhraní UART. Z důvodu vzniku možných bezpečnostních rizik způsobených vysokým napětím jsou mezi sebou balanční moduly odděleny optočleny. Výkonový výstup mikrokontroléru budí MOSFET tranzistor s nízkým odporem v sepnutém stavu. Tento spíná dvojici paralelních rezistorů, čímž je zajištěna funkce balancování.



Obr. 3.11 Převodní charakteristika balančního modulu

Balanční funkce byla u balančních modulů podrobněji analyzována. Na obrázku č. 3.11 je vyobrazena převodní charakteristika jednoho z modulů. Z charakteristiky je patrné, že při nízké hodnotě napětí až do cca 3,4 V je modul prakticky neaktivní. Po překročení této hodnoty dochází k pozvolnému nárůstu proudu. Řízení velikosti balančního proudu je provedeno tranzistorem T1, který pracuje ve spínacím režimu. Nejvyšší hodnoty balančního proudu 350 mA je dosaženo při cca 3,7 V na svorkách balančního modulu. V tento okamžik by již zareagovala bateriová řídicí jednotka X omezením nabíjecího proudu. Popis funkce řídicích jednotek baterií je popsán v následujících odstavcích. Při dalším zvyšování napětí dochází k poklesu balančního proudu. K tomuto jevu dochází z důvodu omezení ztrátového výkonu na mařicích rezistorech RZ1 a RZ2 aby nedošlo k jejich zničení. Po překročení napětí nad 6,6 V je funkce balancování naprosto potlačena, avšak nedojde k jejich destrukci.

Firmou EV-Auto byly poskytnuty také řídicí jednotky baterií s displejem (na obrázku č. 3.12). Tyto bateriové řídicí jednotky jsou ve vozidle celkem tři a starají se o sběr dat ze všech balančních modulů prostřednictvím sériové komunikace. Displeje těchto jednotek byly umístěny na hliníkových boxech akupacků z vnějšku pro lepší čitelnost. Na displeji jsou zobrazovány pouze částečné informace o stavu článků.



Obr. 3.12 Snímek jedné z tří řídicích jednotek baterií

Dalším úkolem těchto jednotek je řízení nabíjecího proudu v závislosti na napětí jednotlivých článků. Toto je zajištěno tzv. FET modulem zapojeným na výstupu každého akupacku. Zpětnou vazbu o velikosti proudu jednotky získávají z proudových sond. Experimentálními testy bylo zjištěno, že ve chvíli, kdy napětí jednoho z článků stoupne na hodnotu přibližně 3,5 V, jednotka zareaguje omezením nabíjecího proudu prostřednictvím modulu FET. Nabíjecí proud je řízen pomocí PWM modulace. Ve chvíli, kdy balanční proud jednoho z článků překročí kritickou hodnotu, je nabíjení již poměrně pomalé. Nabíjecí proud je omezován v závislosti na článku s nejvyšší hodnotou napětí.

Řídicí jednotky baterií dále ovládají kontakty K znázorněné v blokovém schématu celého zapojení na obrázku č. 3.11 v podkapitole Koncepce systému energy managementu. Tyto přemostňují FET modul. V opačném případě jsou rozpojeny ve chvíli, kdy jsou i samotné řídicí jednotky bez napájení, nebo v případě, že napětí jednoho z článků baterie klesne pod kritickou úroveň. Jedná se o bezpečnostní prvek tohoto systému.

Veškeré data z jednotek baterií jsou následně odesílána prostřednictvím sběrnice UART_0, UART_1 a UART_2 do nadřazené jednotky s názvem EMCU. Ta je mostem mezi ostatními elektronickými systémy na vozidle a balančním systémem. Jednotka EMCU přijímá data ze všech tří X jednotek. Tato data zpracuje a odesílá vybrané informace na sběrnici CAN včetně identifikátorů, které jsou jedinečné pro každý „akupack“.

Data odesílaná řídicí jednotkou 530 V do jednotky managementu skrze UART bylo nutné nejprve analyzovat. Toto proběhlo za pomoci převodníku UART – USB a programu Serial Port Monitor. V následující tabulce je popsána sekvence jedné zprávy odeslané z bateriové řídicí jednotky 530 V.

Tab. 3.4 Zpráva jednoho z balančních modulů odeslaná řídicí jednotkou 530 V

Identifikátor	Napětí v mV	Napětí v mV	Balanční proud	Teplota
0xAA	0x0C	0xF6	0x00	0x19

Každý balanční modul odešle na začátku zprávy:

- vždy stejný identifikátor (AA),
- napětí v jednotkách mV, např. (CF6) odpovídá 3318 mV,
- balanční proud např. (00),
- teplotu.

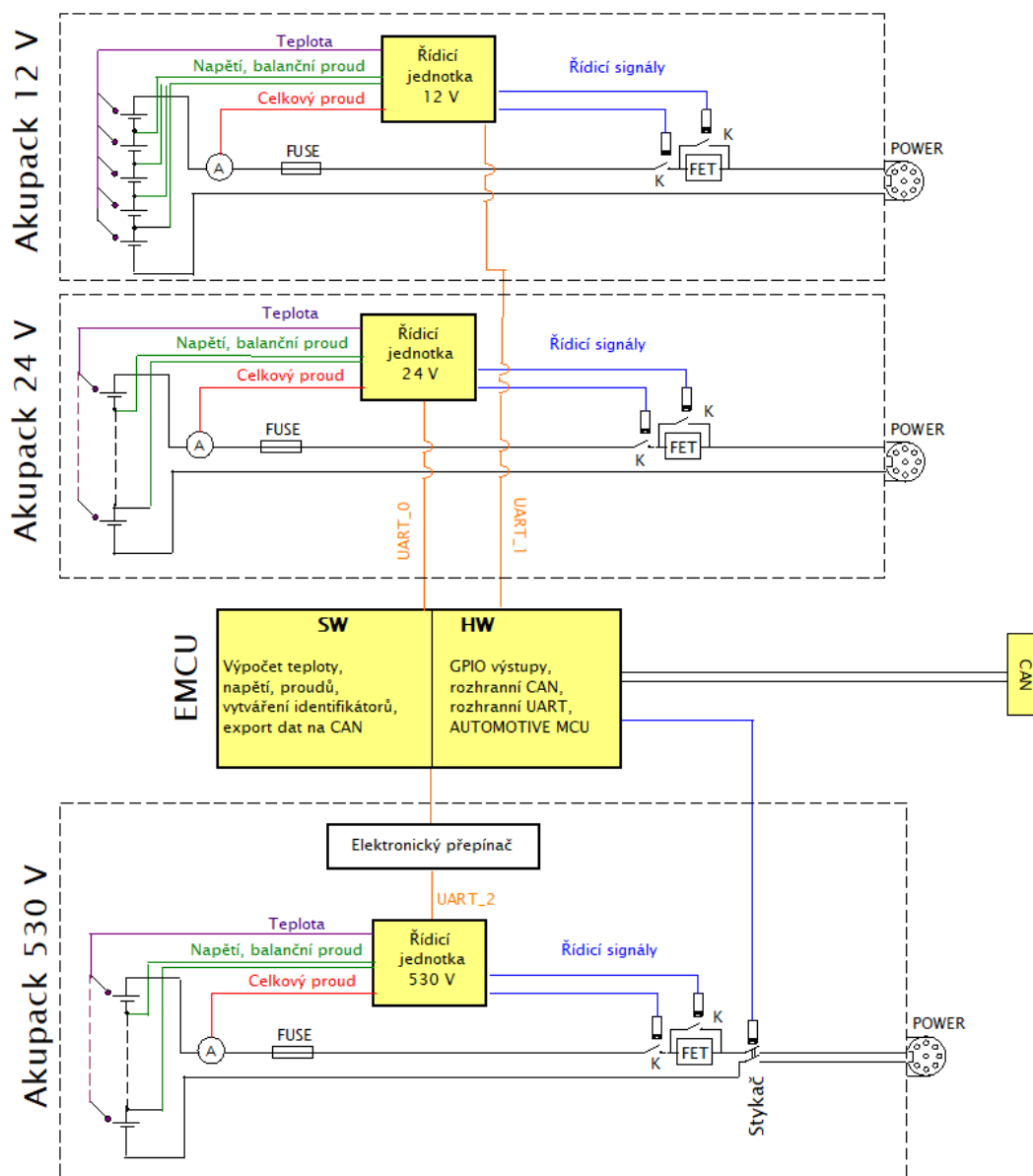
Analýza současného stavu ověřila funkčnost a využitelnost stávajících komponent a technologií. Předchozí práce neměla za cíl řešit finální realizaci a strategii řízení energy managementu, proto zůstanou zachovány typy článků a ověřená koncepce balančního systému.

3.3 Koncepce systému energy managementu

Zapojení celého systému bylo navrženo podle požadavků ostatních elektronických systémů, dále pak s ohledem na zástavbové prostory vozidla a také na funkční bezpečnost. Podklady pro návrh byly poskytnuty dodavatelem balančního systému. Systém EMS se skládá z trojice akupacků, řízených trojicí bateriových jednotek nad kterými vede správu jediná řídicí jednotka energy managementu. Úkolem řídicí jednotky EMCU je:

- zpracování dat z řídicích jednotek baterií,
- vyhodnocení kritického stavu baterií,
- vytvoření CAN datového rámce s přiřazením identifikátorů,
- odesílání dat na sběrnici přístupnou všem systémům na vozidle Democar.

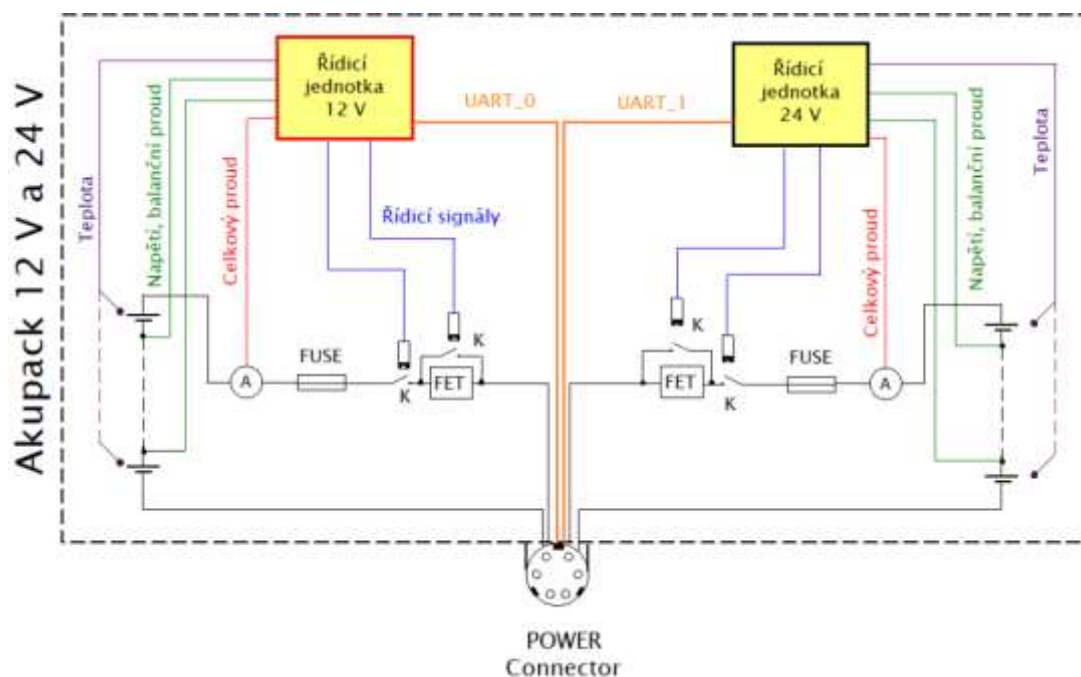
Na následujícím blokovém schématu je vyobrazeno koncepční řešení celého systému EMS.



Obr. 3.13 Blokové schéma systému energy managementu

Akupack 12 V a 24 V

Akupacky o nominálních napětích 12 V a 24 V jsou umístěny ve přední části vozidla, před řídítky. V minulosti byla baterie 24 V umístěna ve spodním boxu spolu s akupackem 530 V, avšak změny rozměrů tohoto boxu vedly k reorganizaci celého bateriového systému. Baterie o napětí 12 V tvoří zdroj energie pro palubní síť a elektronický posilovač řízení. Baterie 24 V je zdrojem pro logickou část měničů a pro motor lineárního vedení servořízení. Spolu s bateriemi jsou v tomto boxu implementovány také dvě řídicí jednotky baterií spolu s FET moduly a s bistabilními relátky, jež jsou na obrázku č. 3.14 označeny písmenem K.

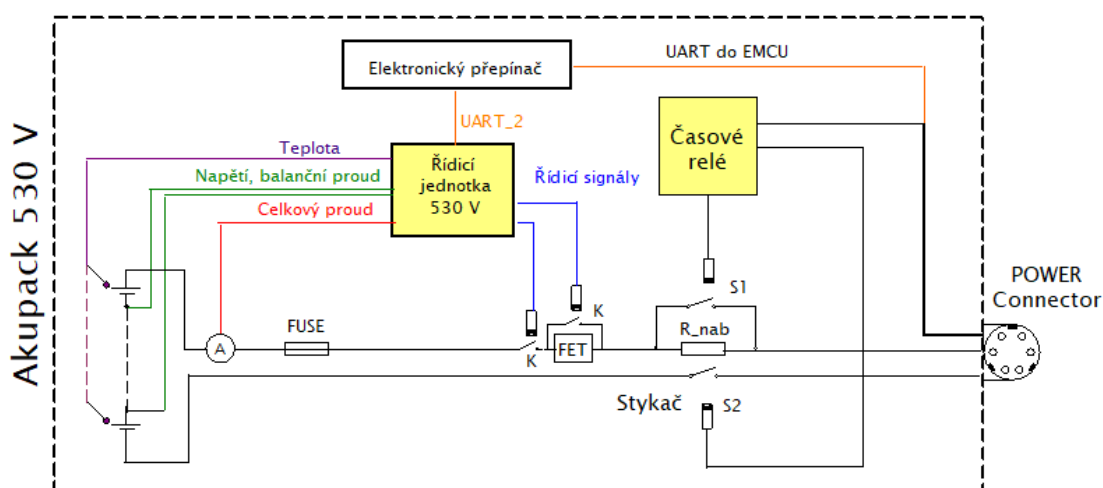


Obr. 3.14 Blokové schéma akupacků 12 V a 24 V

Akupack 530 V

Akupack 530 V spadá podle normy ČSN IEC 449 (33 01 30) do kategorie nízkého napětí a na vozidle Democar reprezentuje zdroj pro pohon. Tento stejně jako 12 V a 24 V akupacky obsahuje řídicí jednotku X, včetně FET modulu a přepínacích kontaktů. Navíc je doplněn o dvojici stykačů, které zajišťují rychlé připojení a odpojení akupacku od zátěže. Nedojde tak ke vzniku hořícího oblouku mezi kontakty s velkým rozdílem potenciálů napětí.

Akupack 530 V je připojován ke střídačům pohonu. S ohledem k tomu, že střídače mají meziobvod s vysokou kapacitou, je nutné postupné nabití meziobvodu všech střídačů. V případě, že by došlo k přímému připojení akupacku k měničům, mohlo by dojít k destrukci měničů. Postupné nabíjení meziobvodu je zjištěno rezistorem R_{nab} , jehož připojení provede časové relé ovládané řídicí jednotkou CCU. Po sepnutí přepínače na dálkovém ovladači (přepínač aktivace pohonu) do druhé polohy je sepnut stykač S2 a po uplynutí přibližně čtyřnásobku časové konstanty je omezovací rezistor překlenut spínačem S1. Tyto dva děje ovládá časové relé. V tuto chvíli je již akupack připojen bez proudového omezení.



Obr. 3.15 Blokové schéma akupacku 530 V

Vzhledem k velkému počtu akumulátorů v tomto akupacku vznikl poměrně velký datový řetězec odeslaný rovněž velkým počtem balančních modulů. Řešením bylo navržení elektronického datového přepínače, o kterém je dále pojednáno v kapitole praktické realizace.

3.4 Definice možných bezpečnostních rizik

Z pohledu bezpečnosti a s ohledem na podstatu celkové koncepce systému napájení je zřejmé, že se jedná o systém s možnými riziky a tedy je nutné definovat konkrétní nebezpečné stavy. V základním dělení se omezím na definici bezpečnostních rizik jednak z pohledu možných mechanických poškození a úrazu elektrickým proudem, a dále na extrémní chybové stavy související s výpadkem funkčnosti a následným výpadkem napájecích úrovní.

- Rizika spojené s běžným provozem:
 - selhání výkonové části (neohrozí okolí ani osádku, zamezení provozu vozidla),
 - selhání vlivem výpadku energie z akupacku 530 V (neohrozí okolí ani osádku, zamezení provozu vozidla),
 - selhání vlivem výpadku energie z akupacku 24 V (možné ohrožení okolí nebo osádky, zamezení provozu vozidla),
 - selhání vlivem výpadku energie z akupacku 12 V (možné ohrožení okolí nebo osádky, zamezení provozu vozidla),
 - požár kabelového svazku/baterie/měniče napětí (možné ohrožení okolí nebo osádky, zamezení provozu vozidla).
- Rizika spojené s nehodou:
 - poškození izolace vlivem nárazu do pevné překážky (neohrozí okolí ani osádku (sít' IT), možné zamezení provozu odpojením akupacku 530 V),
 - požár kabelového svazku/baterie/měniče (možné ohrožení okolí nebo osádky, zamezení provozu vozidla).
- Rizika spojená se selháním elektronických systémů:
 - možná ztráta kontroly nad řízením a ovladatelností (možné ohrožení osádky nebo okolí, zamezení provozu vozidla).
- Rizika při vystavení vozidla povětrnostním vlivům:
 - ztráta izolačního odporu vlivem nadměrné vlhkosti, či zatečení vody do kabelových svazků nebo akupacků. [6]

Jedno z opatření proti vzniku těchto rizikových stavů je galvanické oddělení veškerých systémů vůči rámu vozidla. Izolovaná síť zajistí minimální riziko úrazu elektrickým proudem. V případě snížení izolačních vlastností je vhodné zajistit odpojení hlavních napájecích zdrojů pomocí hlídače izolačního stavu. Proti případné havárii vozidla s pevnou překážkou jsou bateriové sestavy umístěny v robustních hliníkových obalech. Kabelové svazky jsou rovněž pro tento případ chráněny dvojitou izolací. Při vystavení vozidla povětrnostním vlivům shledávám

ochranu proti vniku vody či nadměrné vlhkosti jako nedostatečnou. Provoz vozidla Democar je ve většině případů omezen na interiérové prostory, přesto je mým doporučením do budoucna posílit ochranu proti vlhkosti užitím vhodné izolace bateriových akupacků, zapouzdřením řídicích jednotek a všech ostatních komponent podle předepsaných norem.

V případě výskytu poruchových stavů v systému EMS právě poskytujícího dodávku energie pro systémy zajišťující ovladatelnost vozidla může dojít ke kritickým situacím ohrožujícím bezpečnost okolí. Pro minimalizaci těchto poruchových stavů a jejím předejitím byla provedena podrobná analýza týkající se funkční bezpečnosti. Jedná se o automobilový standard, řešený automobilkami po celém světě.

Funkční bezpečnost lze chápat jako nepřítomnost nepřiměřeného rizika z důvodu nebezpečí způsobeného nesprávným fungováním [3]. Zde je nutné rozdělení systém energy managementu do tří základních kategorií:

- Položka/Item: Systém nebo souhlas systémů, pro implementaci funkce na úrovni vozidla, na který se vztahuje norma ISO 25262.
- Systém: soubor prvků, který se týká alespoň jednoho snímače, regulátoru a pohonu.
- Prvek: je systém nebo součást systému včetně komponentů, hardwaru, softwaru, součástí hardwaru a softwarových jednotek.
- Komponent: prvek na úrovni systému, jež je logicky a technicky oddělitelný a skládá se z více než jedné hardwarové součásti nebo více softwarových jednotek [3]

Následující tabulka udává definici SIL (Safety Integrity Level) podle normy IEC 61508 a ASIL (Automotive Safety Integrity Level) z ISO 26262. Při posuzování rizik je pomocí této tabulky daný poruchový stav klasifikován do normovaných úrovní bezpečnostní integrity. U obou norem platí, že čím větší je požadované snížení rizika, tím spolehlivější je systém a tím vyšší je úroveň integrity.

Tab. 3.5 Bezpečnostní úrovně integrity

Safety Integrity Level (SIL) IEC 61508	Automotive Safety Integrity Level (ASIL) ISO 26262
1	A
2	B
3	C
4	D
	–

Analýza rizik

První krok představuje analýzu rizikových situací neboli hazardních stavů, které mohou při provozu nastat. Na základě těchto zjištěných rizik, jsou dále stanoveny bezpečnostní cíle. Bezpečnostní cíl je stanovisko, jehož účelem je vytvoření požadavku na systém, který by zajistil minimální pravděpodobnost vzniku rizika. Každý bezpečnostní cíl je ohodnocen podle automobilové bezpečnostní úrovně integrity neboli ASIL.

Hodnocení rizik

Za účelem stanovení bezpečnostních cílů byl Technické univerzitě Ostrava poskytnut excelový soubor, jehož náhled je vyobrazen v tabulce č. 3.6. Ve sloupci „possible malfunction“ jsou popsány hazardní stavy, které mohou při provozu nastat a ve sloupci „Situation“ jsou uvedeny situace, během kterých tyto stavy mohou nastat. Dále jsou zde v pravém sloupci uvedeny bezpečnostní cíle. Tyto však přímo neudávají jakými způsoby či prostředky lze hazardním stavům předcházet. Na toto navazuje stanovení funkčních požadavků. Předpokladem je, že se touto problematikou bude zabývat navazující akademická práce.

Tab. 3.6 Klasifikace hazardních stavů do ASIL [S - Severity (závažnost), E - Exposure (četnost závady) a C - Controllability (ovladatelnost)]

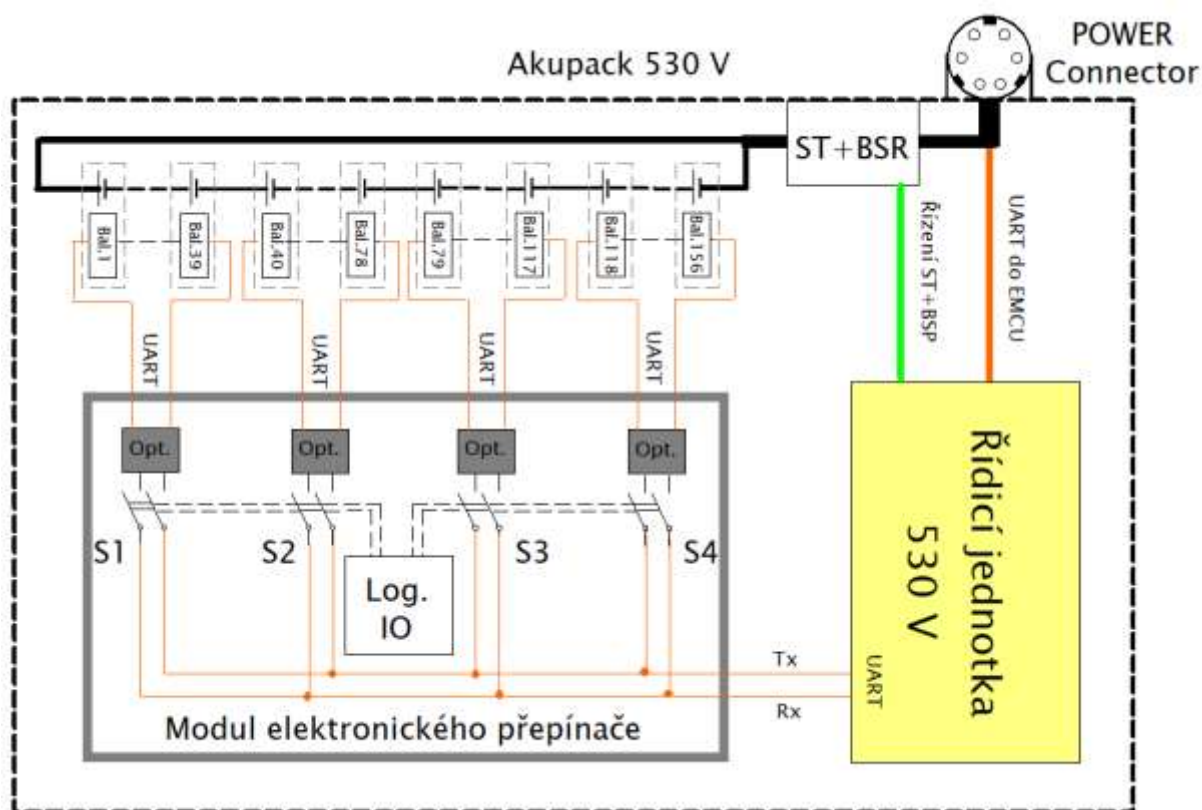
HAZARD IDENTIFICATION		CLASSIFICATION OF HAZARDOUS EVENTS			ASIL	Safety Goal
possible malfunction	Situation	S Argument	E Argument	C Argument		
Znemožnění distribuce poskytované energie -> vypnutí všech systémů včetně brzdového systému a zabránění distribuce HV napětí.	Vozidlo democar osazeno pasažérem, vysoká rychlost, vyhýbání se překážce. Nebo: obsazené vozidlo pasažérem, jízda z kopce, nemožnost zastavení vozidla.	Zamezení ovladatelnosti vozidla. Způsobení újmy na zdraví či smrti člena posádky nebo osobám v okolí.	Pravidelná jízdní situace ve městě nebo v objektu.	Vozidlo zbaveno funkce všech systémů je neovladatelné pro průměrného řidiče. Ostatní účastníci provozu zpravidla nestihnou zareagovat.	D	Zabránění odpojení všech hlavních systémů ovlivňující řiditelnost vozidla pomocí záložního zdroje.
Selhání při nabíjení - vysoké napětí na článku/cích.	Nabíjení v uzavřených prostorách, možnost nadměrného úniku plynů, možnost požáru.	Zavinění požáru, způsobení větší havárie, možnost způsobit smrt osobám v objektu.	Při nabíjení vozidla v objektu.	Neočekávaná situace v objektu obydleného mnoha osobami. Při spánku nemožnou dostatečně rychle zareagovat.	D	Zajištění monitorování napětí na článcích a jejich případné balancování či odpojení.
Selhání při nabíjení - nadproud.					D	Zajištění monitorování nabíjecího proudu. Monitorování balančního proudu a případné odpojení napájení.
Selhání článků - únik plynů z článků.					D	Zajištění dokonalého odvětrávání akupackuů.
Selhání článků - vysoká provozní teplota.	Vznícení článků/ů, možnost požáru a ohrožení pasažéra	Možnost popálení, nebo ohrožení života pasažéra.	Při běžném provozu.	Provoz vozidla a ostatních systémů není ovlivněn, řidič může být popálen.	C	Monitoring teploty článků, dostatečné chlazení.
Poskytování el. Energie HV packu bez ověření izolačního stavu.	Úraz elektrickým proudem			Provoz vozidla zastaven hlídačem izolačního stavu. Nemožnost ovládání vozidla.	B	V případě odpojení HV packu alespoň zajištění funkce řízení a brzdového systému.

4. Praktická realizace

V první části praktické realizace je popsáno zapojení elektronického datového přepínače. V druhé části je vysvětlen popis vyvinutého aplikačního softwaru jednotky managementu energie EMCU demonstračního vozidla Democar.

4.1 Elektronický datový přepínač

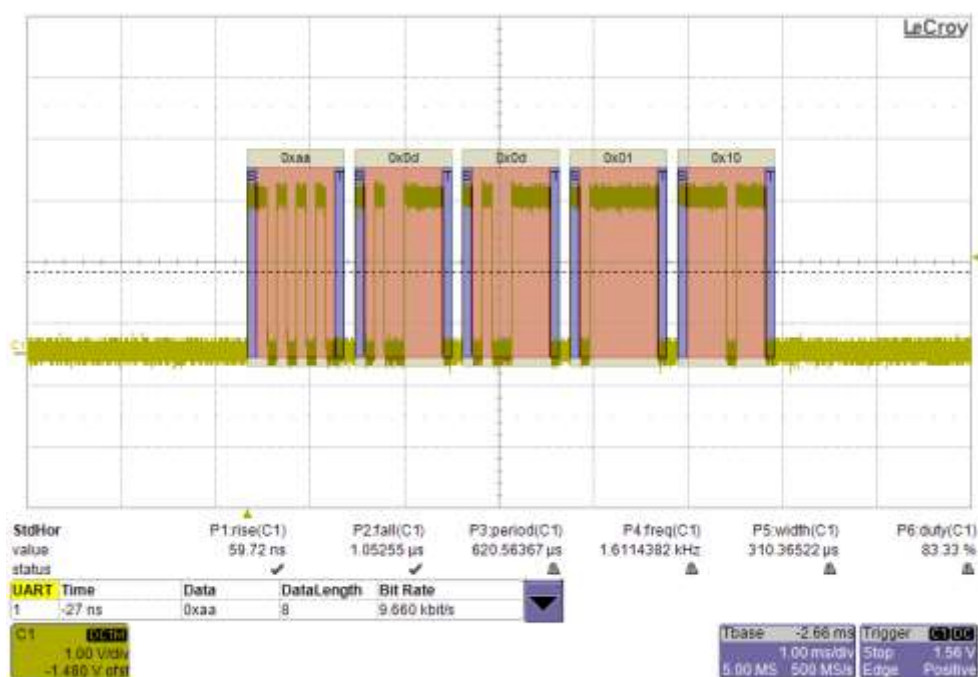
Předchozí řešení energy managementu disponovalo nedostatkem týkajícího se akupacku 530 V. Problém se týkal velkého počtu článků odesílajících příliš velké množství dat do řídicí jednotky 530 V. Testováním se ukázalo, že tamní jednotka dokáže zpracovat data pouze z 39 balančních modulů. Řešením bylo navrhnout zařízení, které z pohledu datové části rozdělí tento akupack do 4 sekcí, a mezi těmito sekcemi bude sekvenčně přepínat. Tím je zajištěno, že řídicí jednotka 530 V odešle potřebné informace do nadřazené jednotky EMCU. Na následujícím obrázku je blokové schéma vysvětlující funkci elektronického datového přepínače.



Obr. 4.1 Zjednodušené blokové schéma elektronického datového přepínače

Logický obvod na obrázku č. 4.1 zabezpečuje funkci přepínání jednotlivých sekcí. Každá sekce představuje 39 článků. Po spuštění systému jsou logickým obvodem IO sepnuty nejprve kontakty S1 vybraného elektronického spínače. V tuto chvíli řídicí jednotka 530 V komunikuje přes optočleny s vybranou sekcí balančních modulů. Výsledkem je, že od těchto modulů získá informace, které jsou pak dále řídicí jednotkou 530 V odeslány řídicí jednotce EMCU k dalšímu zpracování. Po získání informací z první sekce logický obvod vybere následující sekci, tím jsou sepnuty kontakty S2. Přepínání dále pokračuje až do okamžiku, kdy obvod dojde k poslední sekci. Pak pokračuje opět čtením první sekce.

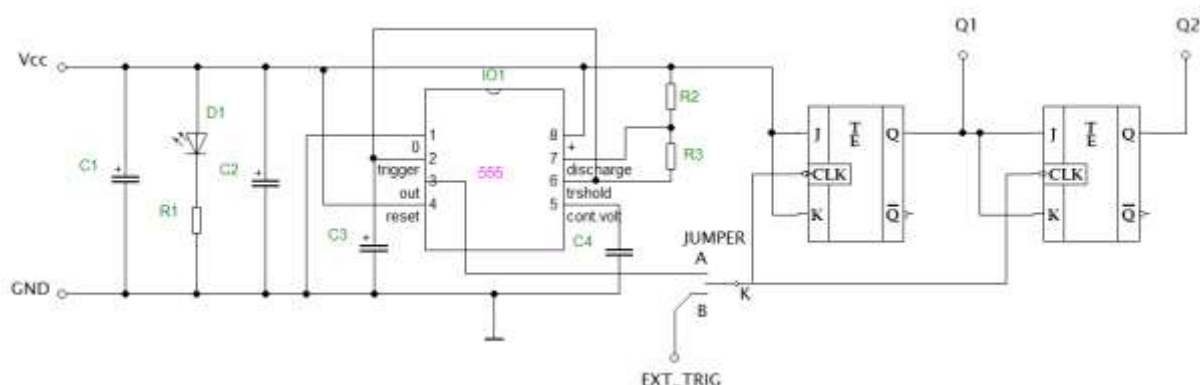
Při návrhu elektronického datového přepínače se nejprve musela analyzovat data odesílaná a přijímaná bateriovou řídicí jednotkou 530V. Analýza ukázala, že řídicí jednotka 530 V nejprve vyšle startovací sekvenci prvnímu balančnímu modulu. Následně je sekvence tímto modulem přijata, zkontrolována a odeslána následujícímu balančnímu modulu. Tento děj se opakuje, dokud data nedojdou zpět do řídicí jednotky. Startovací sekvence byla zaznamenána pomocí osciloskopu (obrázek č. 4.2).



Obr. 4.2 Startovací sekvence pro první balanční modul

Následně byla změřena délka datového rámce odeslaná 39 balančními moduly. Tato časová délka odpovídá přibližně 15 sekundám a je potřebná pro určení doby přepnutí elektronického přepínače.

Jednotlivé sekce bateriových modulů jsou od bateriové řídicí jednotky 530 V z důvodu bezpečnosti odděleny optočleny. Přepínání jednotlivých sekcí je řešeno pomocí sekvenčního obvodu, který na základě taktovacího signálu z astabilního obvodu vytváří dvoubitové binární číslo v rozsahu hodnot od 0 do 3. Řešení tohoto problému je vyobrazeno na schématu níže.



Obr. 4.3 Generátor hodinového signálu s dvoubitovým čítačem

Celé zařízení je napájeno z bateriové řídicí jednotky 530 V, která poskytuje přepínač stabilizovaný zdroj 5 V. Základem zapojení je integrovaný obvod NE555 (na obrázku č. 4.3) zapojený jako astabilní multivibrátor. Po připojení napájecího napětí k obvodu je kondenzátor C3 plně vybitý. Na výstupním pinu č. 3 je v tuto chvíli nízká logická úroveň. Přes rezistory R2 a R3 se kondenzátor začne nabíjet. Při jeho nabití na více než $2/3$ napájecího napětí se výstup přepne na logickou 0. Následně se kondenzátor začne vybíjet přes rezistor R3 a vnitřní tranzistor na pinu č. 7. Napětí na kondenzátoru dále klesá, až do úrovně $1/3$ napájecího napětí, kdy se výstup opět přepne na logickou hodnotu 1. Tento děj se stále opakuje s periodou odpovídající hodnotám zmíněných pasivních součástek. Takto vytvořený generátor hodinového signálu je zdrojem taktů pro dvoubitový čítač zobrazený v pravé části obrázku č. 4.2. V zapojení je dále implementován propojovací jumper reprezentující ve schématu dvupolohový přepínač. V jeho základní poloze propojení pinu A s pinem K je dvoubitový čítač taktován pulzy z časovače. Propojením pinu B s pinem K je možné využít externího taktovacího signálu.

Výpočet parametrů součástek:

- a) doba nabíjení

$$tnab = 0,693.(R2 + R3).C3 [s; \Omega, \Omega, F], \quad (4.1)$$

- b) doba vybíjení

$$tv_{yb} = 0,693.R3.C3 [s; \Omega, F] \quad (4.2)$$

c) délka periody

$$T = t_{nab} + t_{vyb} [s; s, s] = 0,693 \cdot (R2 + 2R3) \cdot C3 [\Omega, \Omega, F] \quad (4.3)$$

d) frekvence výstupu

$$f = 1 / T [Hz; s] \quad (4.4)$$

Doba potřebná pro příjem datového rámce z 39 článků odpovídá přibližně 15s. Tato doba zároveň určuje frekvenci obdélníkového signálu generovaného časovačem.

$$t_{přijmu} = t_{vyb} = 15 s$$

Konkrétní zapojení s časovačem NE555 neumožňuje dodržet střidu výstupního signálu aby přesně odpovídala 50%. Kompromisem bylo stanovit dobu nabíjení kondenzátoru C3 o 400 ms delší.

$$t_{nab} = 15.4 s$$

$$T = t_{nab} + t_{vyb} = 30.4 s \quad (4.3)$$

Ze vztahu 4.4 pro výpočet frekvence platí:

$$f = \frac{1}{T} = 0,032 Hz. \quad (4.4)$$

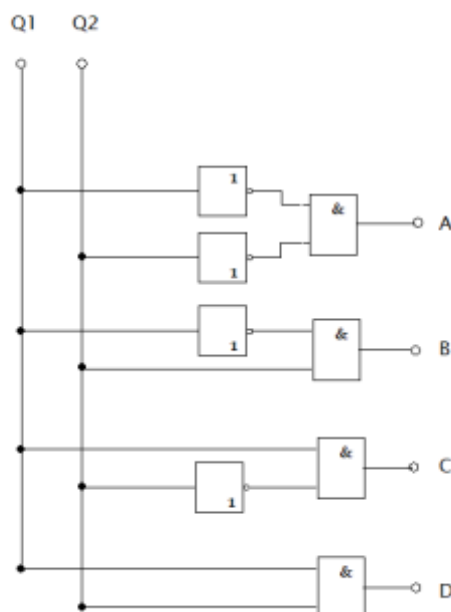
Ze vztahu 4.2 pro výpočet doby vybíjení a zvolené hodnoty kondenzátoru C3 = 470 uF byla určena hodnota rezistoru R3.

$$R3 = \frac{1,443 \cdot t_{vyb}}{C3} = \frac{1,443 \cdot 15}{4,7 \cdot 10^{-4}} \approx 47\,000 \Omega \quad (4.2)$$

Podobným způsobem byl vypočítán odpor rezistoru R2 ze vztahu 4.1.

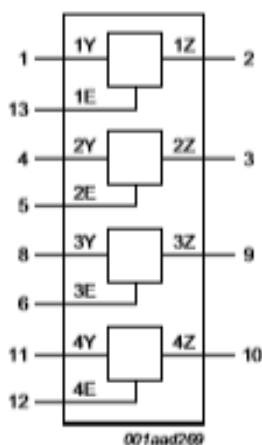
$$R2 = \frac{1,443 (t_{nab} - 0,693 \cdot C3 \cdot R3)}{C3} \approx 270 \Omega \quad (4.1)$$

Výstupy Q1 a Q2 dvoubitového čítače jsou připojeny ke vstupům logického obvodu selektoru 1zN zobrazenému na obrázku č. 4.4. Tento obvod obsahuje čtyři výstupy, které spínají jednotlivé vstupy elektronických přepínačů označených na obrázku č. 4.5. Obvod 1zN na základě taktovacího signálu z generátoru postupně vybere jeden z N výstupů, čímž je dosaženo funkce přepínání jednotlivých sekcí.



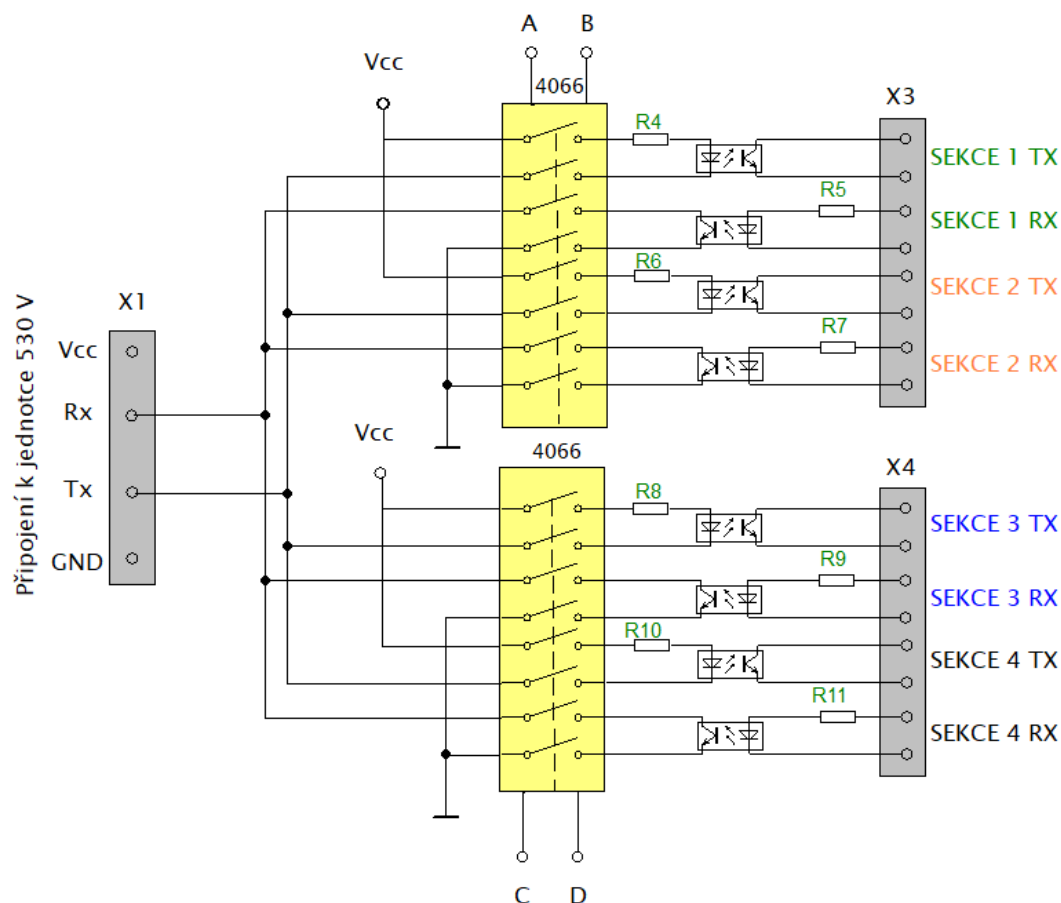
Obr. 4.4 Selektor 1zN

V případě, kdy na obou vstupech Q1 a Q2 je logická úroveň 0, je vybrán výstup A. Na něm je v tuto chvíli vysoká logická úroveň 1 a na ostatních výstupech je log. 0. V případě, kdy na vstupu Q1 je log. 0 a na vstupu Q2 je log. 1, je vybrán výstup B. Tento děj se opakuje až do doby, kdy čítač napočítá do 3. Poté se čítač vynuluje a výběr výstupů se opakuje.



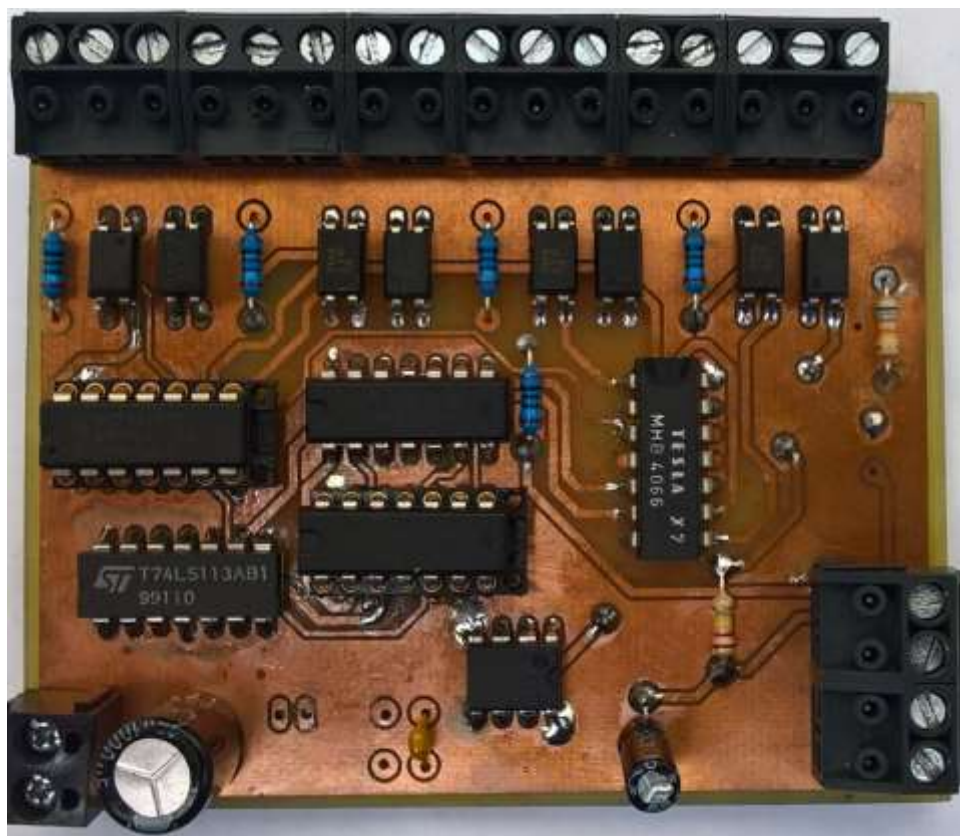
Obr. 4.5 Funkční diagram elektronického přepínače 4066 [5]

Výstupy selektoru 1zN jsou připojeny ke vstupům dvojice obvodů elektronických přepínačů vyobrazených na obrázku č. 4.6. Jedná se o obvody analogových jednopólových přepínačů z řady 74LS4066. Každý přepínač obsahuje dva vstupně/výstupní terminály (nY a nZ). Propojení těchto terminálů je možné přivedením vysoké logické úrovně na daný pin (nE). V případě přivedení nízké úrovně na pin nE se spínač vypne. [5]



Obr. 4.6 Koncepce zapojení použitých obvodů v elektronickém datovém přepínači

Ke vstupní svorkovnici X1 na obrázku č. 4.6 je připojena řídicí jednotka 530 V. Ta odešle na začátku startovací sekvenci pro první balanční modul. V tu chvíli je již připojena první sekce balančních modulů prostřednictvím svorkovnice X3. Sekce balančních modulů č. 1 je aktivní až do uplynutí doby 15 sekund. Poté je logický obvod okamžitě překlopen a aktivuje druhou čtveřici přepínačů, čímž je připojena sekce 2. Po uplynutí přibližně jedné minuty se děj opakuje a sekce 1 je opět aktivní.



Obr. 4.7 Vývojová deska elektronického datového přepínače

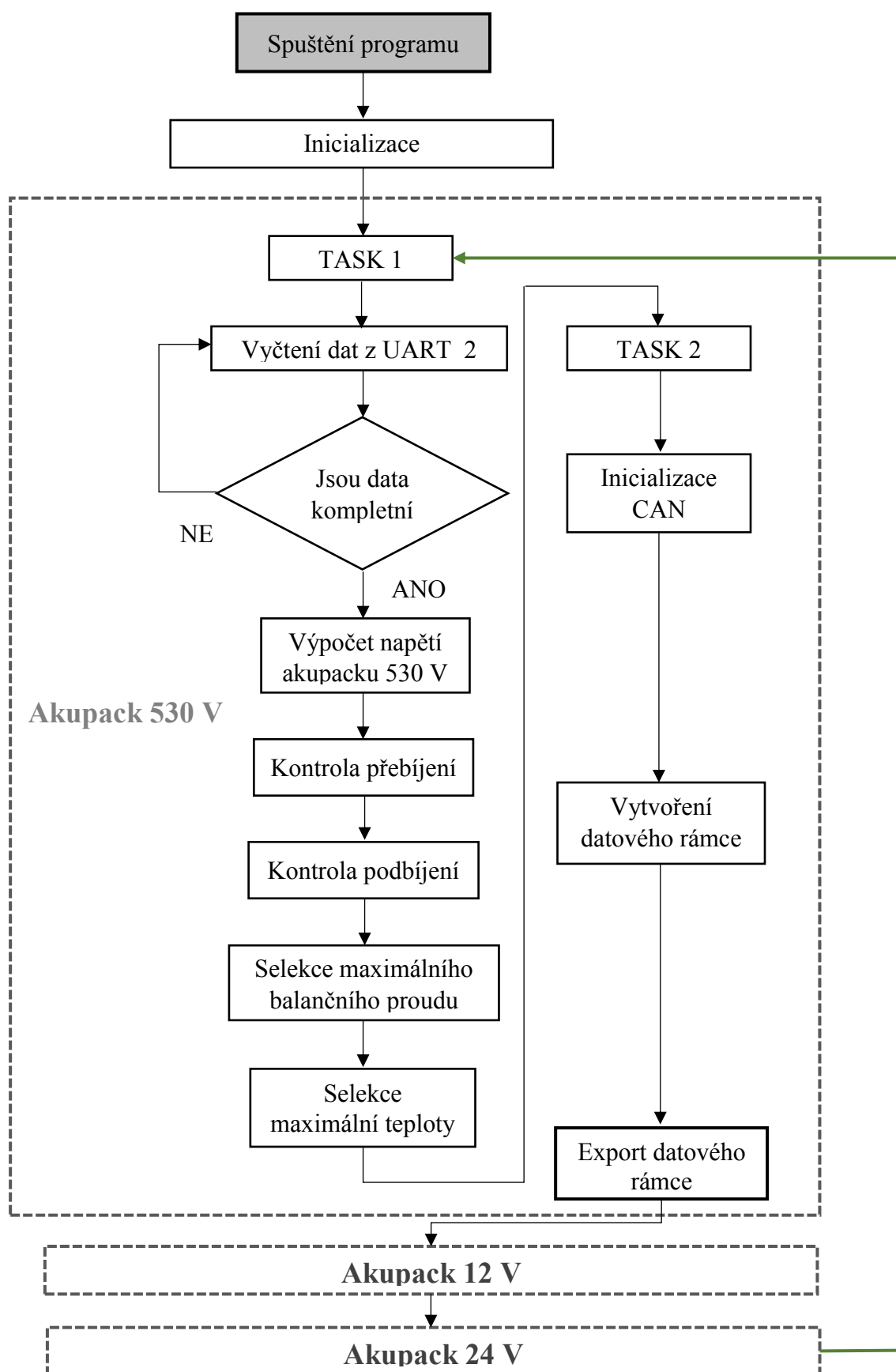
Navrhnutý elektronický přepínač byl nejprve otestován v simulačním prostředí Multisim 12, kde byly odladěny funkční nedostatky. Posléze byla navržena deska plošného spoje v prostředí Eagle. Výstupem se stala vývojová deska plošného spoje, která byla dále osazena součástkami a otestována v provozu. Rozměry elektronického přepínače byly voleny s ohledem na možnou implementaci do řídicí jednotky baterie 530 V, kde byla následně také vložena. Pro další využití byla navržena nová koncepce elektronického přepínače, rozšířena o indikaci aktuálně přepnuté sekce. Desku plošného spoje včetně schématu přikládám do přílohy písmeno A.

4.2 Vývoj aplikačního softwaru

System energy managementu obstarává především distribuci dodávky elektrické energie do ostatních elektronických systémů. Další funkcí je řízení dobíjení akumulátorů a udržení jejich parametrů v předepsaných mezích. V neposlední řadě systém zajišťuje monitoring parametrů akumulátorů.

Funkcí vyvinutého aplikačního softwaru je zpracování parametrů akumulátorů na základě dat odeslaných řídicími jednotkami baterií. Druhou funkcí je následná kontrola, selekce a export těchto parametrů na sběrnici CAN za účelem využití těchto informací ostatními systémy.

V první etapě při návrhu aplikačního software byl využit vývojový kit od firmy NXP s označením TWRPXS20, na němž probíhalo seznámení se s programovacím prostředím CodeWarrior. Výše popsany kit disponuje totožným mikrokontrolérem použitým v řídicí jednotce energy managementu. Následně bylo provedeno oživení řídicí jednotky energy managementu a odladění vytvořeného softwaru. Na následujícím vývojovém diagramu je uveden popis jeho funkce.



Obr. 4.8 Vývojový diagram aplikačního software

Na začátku programu proběhne inicializace, poté se vytvoří dvě úlohy, tzv. tasky s označením TASK1 a TASK2. V prvním tasku probíhá program energy managementu, v druhém probíhá zhotovení zpráv na CAN.

V tasku 1 vznikne požadavek na vyčtení dat ze sběrnice UART_2. Program v tuto chvíli vyčkává na příjem první sekce dat odeslaných řídicí jednotkou baterie 530 V. Po jejich příchodu data uloží do pole proměnných a provede kontrolu, zda jsou všechna data na svém místě v tomto poli. Pokud ano, provede výpočet celkového napětí akupacku. V blocích kontrol přebíjení a podbíjení je provedena kontrola jednotlivých článků na podbití a přebití. V případě, že se projeví jeden z těchto stavů, vytvoří se příznaky v podobě proměnných battflagLo nebo battflagHI. Poté program pokračuje do bloku selekce maximálního balančního proudu, kde jsou do pole proměnných uloženy hodnoty balančních proudů. Z těchto je následně vybrána maximální hodnota. Stejný výběr je realizován i v následujícím bloku selekce maximální teploty. Následně je v tasku 2 vytvořena CAN zpráva. Do zprávy jsou naimplementovány získané parametry článků a každému akupacku je přiřazen odpovídající identifikátor. Akupacku 530 V odpovídá identifikátor 1500, akupacku 24 V odpovídá identifikátor 1400 a akupacku 12 V identifikátor 1300. Celá zpráva je následně odeslána na sběrnici CAN. Jedna takto odeslaná zpráva obsahuje 2 bajtový identifikátor a 6 bajtů dat. Struktura zprávy je popsána v následující tabulce.

Tab. 4.1 Příklad datového rámce odeslaného na sběrnici CAN

Identifikátor	Napětí akupacku 1. bajt	Napětí akupacku 2. bajt	Maximální teplota článků	Maximální balanční proud	Příznak podbití	Příznak prebití
1500	0x30	0xD9	0x19	0x00	0x00	0x00

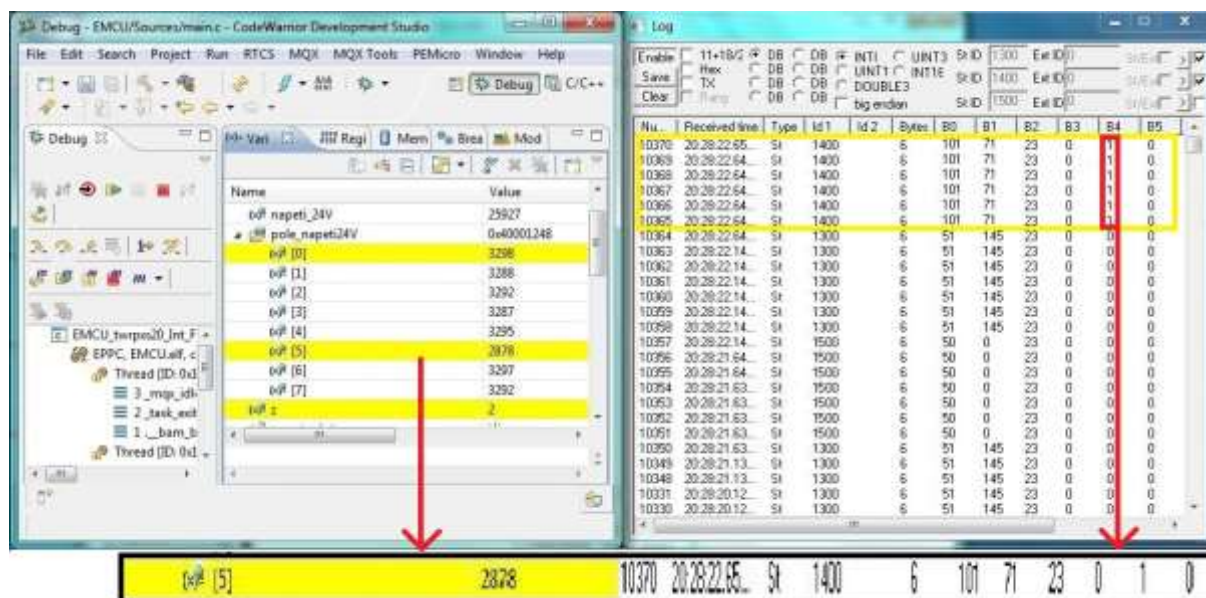
Celý tento cyklus popisuje export datového rámce na sběrnici CAN pouze pro akupack 530 V. Obdobný cyklus je následně spuštěn i pro 12 V a 24 V akupacky.

5. Experimentální ověření

Ve stádiu ověřování funkce systému byl celý systém zkompleťován a implementován do demonstračního vozidla Democar. Oživená řídicí jednotka energy managementu byla propojena s bateriovými řídicími jednotkami akupacků 12 V a 24 V. Výstup z řídicí jednotky EMCU byl napojen na sběrnici CAN. Poté byly odhaleny a následně odladěny nedostatky vyvinutého aplikačního software díky kontrole odeslaných dat na sběrnici pomocí převodníku PPToCAN se současně spuštěným debugovacím prostředím CodeWarrior. Stejným způsobem proběhlo propojení a odladění posledního akupacku 530 V. Po ověření funkční koncepce následovaly praktické testy, které měly ověřit správnou funkci softwaru řídicí jednotky. Testy byly provedeny na všech třech akupacích.

5.1 Test detekce stavu podbíjení

V testu detekce stavu podbíjení byly bateriové sestavy uvedeny do stavu úplného vybití za pomoci aktivní zátěže. Akumulátory byly vybíjeny do stavu, kdy došlo na jednom z článků baterie ke kriticky nízké úrovni napětí odpovídající hodnotě 3V nastavené v řídicí jednotce energy managementu. V tuto chvíli řídicí jednotky baterií zareagovaly odpojením baterie od zátěže skrze bistabilní relé. Pro názornost je na následujícím obrázku uveden snímek obrazovky, na kterém je testován akupack 24 V.



Obr. 5.1 Experimentální ověření při podbíjení

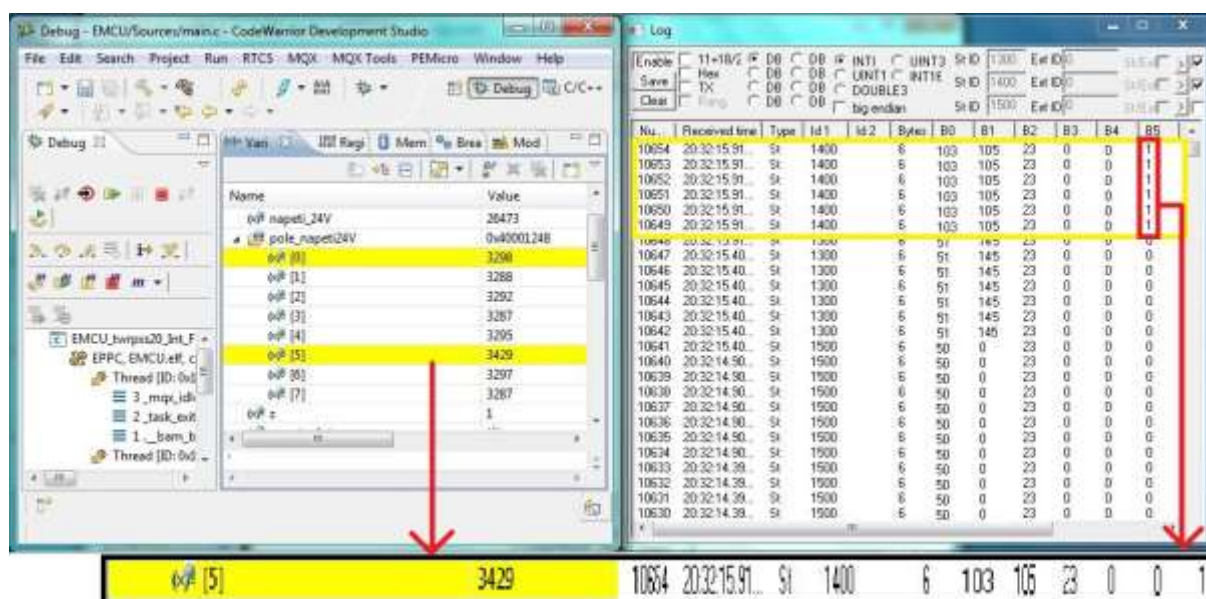
Při pohledu na obrázek č. 4.8 vpravo je spuštěno prostředí PPToCAN. Tato aplikace umožňuje za pomoci převodníku CAN-USB sledovat stav na sběrnici CAN. Za pomoci logovací funkce byly v tomto programu zachyceny zprávy odeslané řídicí jednotkou energy managementu na sběrnici CAN. Na levé straně obrazovky je současně spuštěno debugovací prostředí programu CodeWarrior, v němž se nachází programové proměnné představující hodnoty napětí jednotlivých článků v baterii 24 V. Nejslabším článkem baterie se při testu vybíjení ukázal článek č. 5 (vyznačen žlutě). Při poklesu jeho hodnoty napětí pod 3 V byl změněn stav stavové proměnné battflagLo na hodnotu 1, následkem čehož se na pravé straně obrazovky v prostředí PPToCAN změnila hodnota bajtu B4, jedná se o příznak podbíjení. Pro lepší čitelnost byl úryvek z odeslaných zpráv uveden do tabulky 5.1.

Tab. 5.1 Úryvek několika zpráv odeslaných na sběrnici CAN

Číslo zprávy	Čas přijetí	Formát	Identifikátor č. 1	Identifikátor č. 2	Počet bytů	B0 (Napětí čl.)	B1 (Napětí čl.)	B2 (Teplota čl.)	B3 (Bal. proud)	B4 (Podbíjení)	B5 (přebíjení)
10364	20:28	Standart	1300	0	6	51	145	23	0	0	0
10370	20:28	Standart	1400	0	6	101	71	23	0	1	0
10357	20:28	Standart	1500	0	6	50	0	23	0	0	0

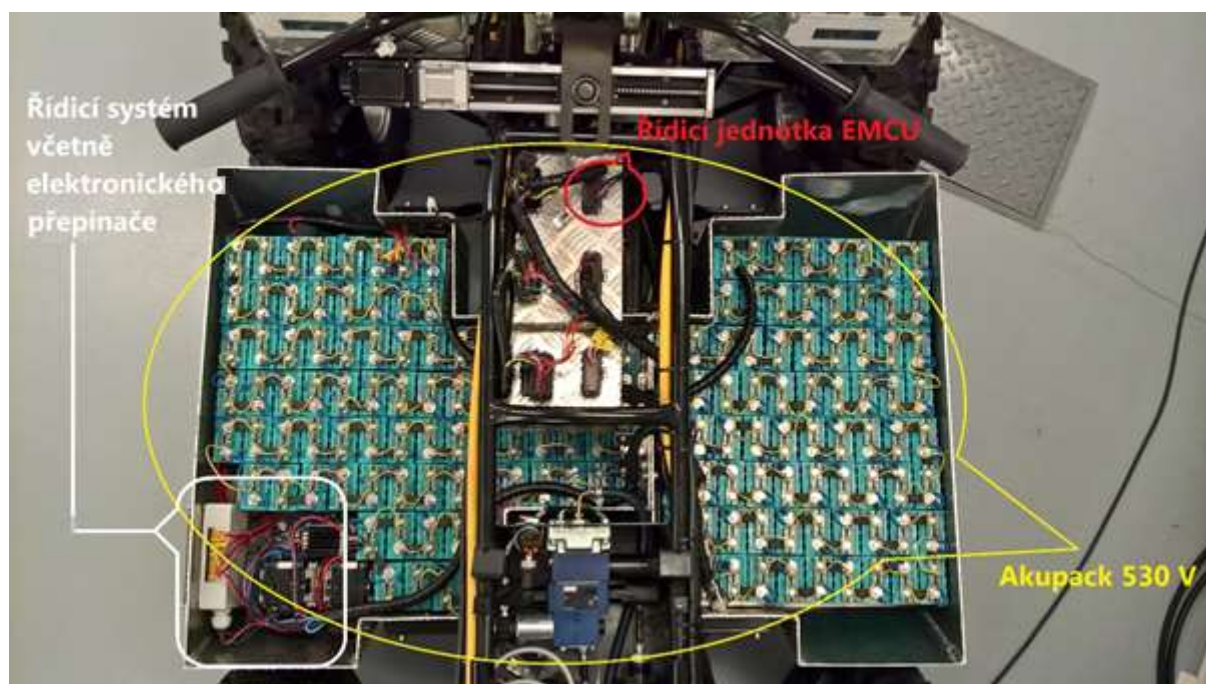
5.2 Test detekce stavu přebíjení

Při tomto testu byla baterie 24 V nabíjena přes bistabilní relé balančního systému za pomoci lineárního laboratorního zdroje. Nabíjení pokračovalo až do okamžiku, kdy se napětí na jednom z článků zvýšilo nad limitní hodnotu 3,5 V. Na tento stav okamžitě zareagovala bateriová řídicí jednotka 24 V odpojením bistabilního relé, čímž se nabíjení zastavilo. Úkolem řídicí jednotky energy managementu bylo detekovat stav přebíjení, ke kterému dochází při překročení napětí na jednom z článků baterie nad 3,4 V. Následně byla vytvořená data odeslána na sběrnici CAN.

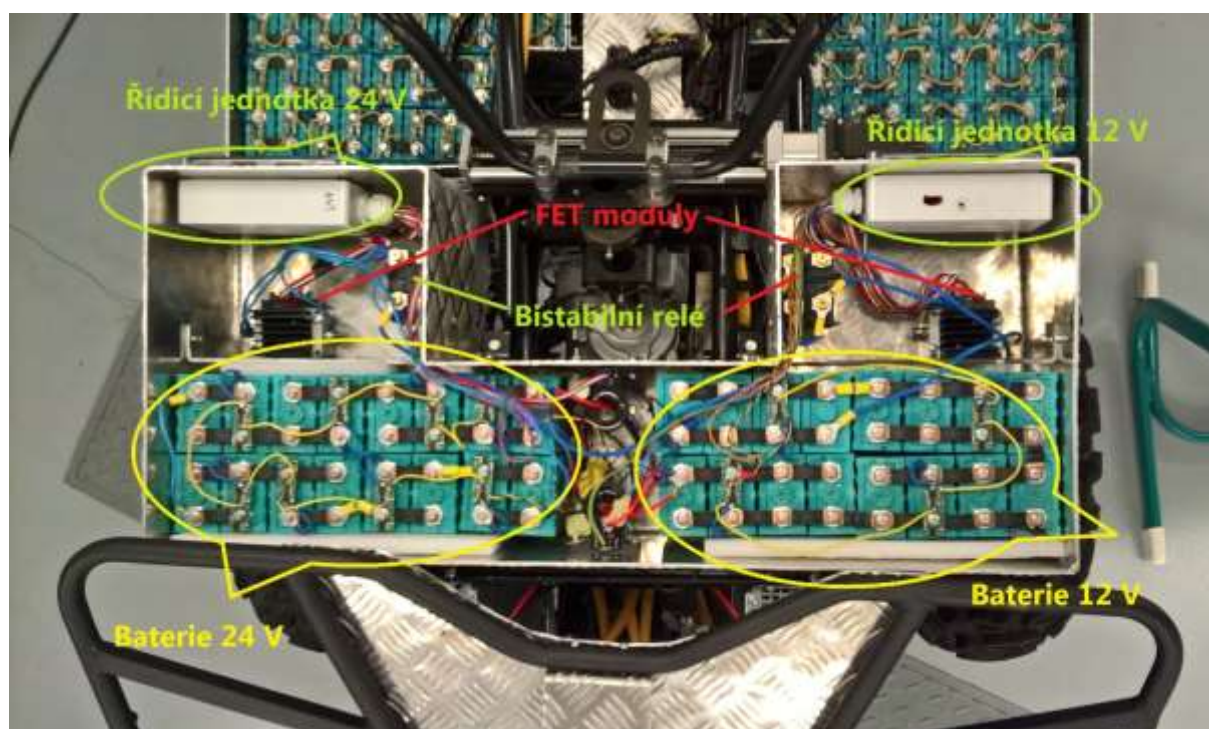


Obr. 5.2 Experimentální ověření při přebíjení

Na následujících dvou obrázcích jsou fotografie systému energy managementu implementovaného do vozidla Democar.



Obr. 5.3 Fotografie akupacku 530 V



Obr. 5.4 Akupacky 12 V a 24 V

Veškeré návrhy a jejich praktická realizace probíhaly v laboratořích vysoké školy. Za pomoci vyspělé techniky bylo možné velice rychle analyzovat vzniklé problémy. Demonstrační vozidlo je nyní schopné provozu.

6. Závěr

Cílem této diplomové práce byl návrh a realizace energy managementu demonstračního vozidla s elektrickým pohonem, přičemž řešení mělo efektivně navázat na předchozí koncepční řešení. Jeden z klíčových požadavků, pro prvotní kroky vývoje, byla analýza současného stavu systému energy managementu, s čímž souviselo rovněž seznámení se s dílčími komponenty. Jednalo se zejména o akumulární články, balanční systém, řídicí jednotku energy managementu aj. Součástí se stala rovněž analýza ostatních kooperujících elektronických systémů a jejich požadavků na napájení. Mimo jiné byla vytvořena tabulka požadavků na napájecí úroveň, která nestanovila požadavek na novou napájecí úroveň. Následně byl proveden jízdní test, který odhalil nedostatečnou kapacitu baterie 12 V.

Na základě seznámení s použitým balančním systémem byla navržena koncepce zapojení celého systému tak, aby jej bylo možné umístit v modifikovaných hliníkových boxech. Tímto byla vytvořena trojice akupacků. Požadavkem jednoho z vytvořených akupacků byl také návrh elektronického datového přepínače, který měl odstranit nedostatky týkající se velkého počtu balančních modulů. Součástí kapitoly návrhu se stala také definice možných bezpečnostních rizik.

Obsahem praktické realizace byl návrh aplikačního softwaru pro řídicí jednotku energy managementu a návrh a výroba elektronického datového přepínače. Nově vyvinutý aplikační software spolu s elektronickým datovým přepínačem zajišťuje monitoring aktuálních parametrů akumulátorů, které budou do budoucna využity ostatními elektronickými systémy.

Celý systém energy managementu byl poté implementován do struktury demonstračního vozidla. Při testování se objevily problémy týkající se disfunkce krystalu a vadného mikrokontroléru na řídicí jednotce EMCU. Tento problém se vyřešil náhradou vadných komponent. Problémy se vyskytly také při oživení elektronického datového přepínače, u kterého byla špatně odhadnuta frekvence přepínání. Následně byla funkce systému energy managementu ověřena jedním cyklem nabíjení/vybíjení. Při vybíjení pod kritickou mez kapacity jednoho z článků systém správně zareagoval odpojením zátěže od akupacku a zároveň poskytl informaci o podbitém článku ostatním elektronickým systémům. Při testu nabíjení, kdy docházelo k přebíjení jednoho z článků energy management systém omezil nabíjecí proud pomocí FET modulu a následně nabíjení zcela ukončil odpojením akupacku skrze bistabilní relé.

Seznam použité literatury

- [1] *Lithium fosfátové baterie (LiFePO₄):* - [online]. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.gwlpower.cz/lithium-fosfatove-baterie-lifepo4/>
- [2] *Battery Cell Balancing: What to Balance and How* [online]. In: . s. 8 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.ti.com/download/trng/docs/seminar>.
- [3] *Automotive Quality Universe: Řízení kvality bezpečnosti* [online]. 2017 [cit. 2018-4-2].
- [4] *Zapojení časovače 555: Astabilní zapojení* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/text-zapojeni-casovace-555/> [5] GOOK, Michael. *Hardwarová rozhraní: průvodce programátora*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2006, 463 s. Hardware (Computer Press). ISBN 80-251-1019-2
- [5] *Quad single-pole single-throw analog switch* [online]. 2015 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT4066.pdf
- [6] ALEŠ, Jarolim. *Návrh a praktická realizace koncepce managementu napájení vozidla s elektrickým pohonem Democar* [online]. VŠB-TUO, 2016 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/115784>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská.
- [7] DULANSKÝ, David. *Sestavení funkční koncepce a vývoj aplikačního software elektronického systému servořízení elektromobilu Democar* [online]. VŠB-TUO, 2016 [cit. 2018-5-20]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/115124>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská

Seznam příloh

1. Příloha A – Dokumentace k elektronickému datovému
přepínači
2. Příloha B - Dokumentace k obvodu 74LC4066
3. Příloha C – Dokumentace k řídicí jednotce EMCU
4. Příloha D – Pinout k mikrokontroléru MPC5643L